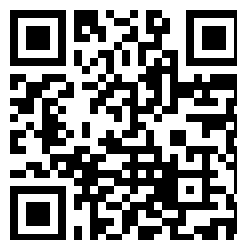

This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

GoogleTM books

<https://books.google.com>





A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>



THE LIBRARY
OF THE



CLASS En 620.6

BOOK q Soll



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

EDITE
PAR LA
SOCIÉTÉ ANONYME
"REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"
(au capital de 400 000 fr)
12, Place de Laborde, PARIS 8^e.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS A ÉTÉ RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886.

QUATRIÈME SÉRIE.
TOME II. — ANNÉE 1922



SIÈGE SOCIAL {
LABORATOIRE { 12 et 14, rue de Staël.
à Paris (15°).

PARIS

SOCIÉTÉ ANONYME "REVUE GÉNÉRALE DE L'ÉLECTRICITÉ"

ÉDITEUR

12, PLACE DE LABORDE, PARIS 8^e.

1922

TO YTBREVAU
ATOBMM
YBAMU

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion mensuelle du 4 janvier 1922, p. 5 ; Admission de membres titulaires, p. 5. — Les grands problèmes actuels de l'appareillage électrique ; les appareils à très haute tension ; les isolateurs suspendus ; les disjoncteurs ultra rapides ; les disjoncteurs sélecteurs (M. VÉDOVELLI), p. 9. — Procédé Outtier pour l'amélioration du cosinus φ d'une installation à l'aide d'une installation de condensateurs (M. MAURICE LEBLANC fils), p. 69.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 72.

BIBLIOGRAPHIE, p. 77.

IL Y A TRENTE ANS, p. 80.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 4 janvier 1922. (1)

PRÉSIDENCE DE M. JEAN REY.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Andraut (Jacques), Elève à l'E. S. E., 122, rue Président-Wilson, à Levallois-Perret (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ne responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Babin** (Louis-Charles), Lieutenant de vaisseau, Elève à l'E. S. E., 48, avenue Belmontet, Côteaux de Saint-Cloud (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Betbeder-Matibet** (Louis), Elève à l'E. S. E., 260, rue Saint-Jacques, à Paris, 5°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Blampoix** (Joseph-Henri), Elève à l'E. S. E., 5, rue du Regard, à Paris, 6°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Bibliothèque universitaire de Bordeaux**, 20, cours Pasteur, à Bordeaux (Gironde). — Présentée par MM. Leblanc fils et Jouvion.
- De Brun** (Paul-Marie-Joseph), Elève à l'E. S. E., 2 bis, quai des Célestins, à Paris, 4°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Charnet** (Jean-Marie-Pierre), Ingénieur électricien à la Société centrale d'Entreprises, 5, rue Berryer, à Paris, 8°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Chevallier** (Franck-Charles), Elève à l'E. S. E., 11, rue Delambre, à Paris, 14°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Chevallier** (Léon-Armand), Elève à l'E. S. E., 52, avenue de Saint-Cloud, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Darnault** (Paul-Henri), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 3, rue Fustel-de-Coulanges, à Paris, 5°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Destival** (Pierre-Léo-Robert-Louis), Elève à l'E. S. E., 61, rue Madame, à Paris, 6°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Duorot** (Marcel-André), Ingénieur E. P. C. I., Elève à l'E. S. E., 18, avenue Carnot, à Paris, 17°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Elleboode** (Paul-Charles), Licencié ès-sciences, Elève à l'E. S. E., 19, rue de l'Arbre-Sec, à Paris, 1°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Galine** (Maurice-Arsène), Elève à l'E. S. E., 3, rue Cujas, à Paris, 5°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Garnier** (Claude-Alexandre), Elève à l'E. S. E., 26, rue d'Arnemontville, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Gerbeaux** (André-Louis-Léon), Elève à l'E. S. E., 14, rue Vallier, à Levallois-Perret (Seine). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Geschwindenhamer** (Louis), Capitaine du Génie, Elève à l'E. S. E., 8, villa Ségur, à Paris, 7°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Godbille** (Paul-Georges), Ingénieur E. S. E., à la Compagnie générale d'Electricité, 93, rue Nollet, à Paris, 17°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Guérande** (Hector-Louis-Gustave), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 13, rue Nicolas-Charlet, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Guilbert** (André-Vincent-Ernest-Cyrille), Licencié ès-sciences, Ingénieur E. S. E., Chef de travaux à l'Ecole supérieure d'Electricité, 248, boulevard Raspail, à Paris, 14°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Jarre** (Emile-Edme), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 198, rue de Vaugirard, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Kahn** (Roger), Elève à l'E. S. E., 3, rue Georges-Ville, à Paris, 16°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Kenn** (Félix), Elève à l'E. S. E., 15, rue de Constantinople, à Paris, 8°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- De Lambilly** (Alain-Charles), Enseigne de vaisseau de 1^{re} classe, Elève à l'E. S. E., 30, rue de Séné, à Vannes (Morbihan). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Letrilliart** (Pierre-Henri), Ingénieur E. S. E., Chef de travaux adjoint à l'Ecole supérieure d'Electricité, 87, boulevard de Port-Royal, à Paris, 16°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Maire** (Noël-Ferdinand-Joseph), Elève à l'E. S. E., 39, avenue Duquesne, à Paris, 7°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Mermet** (Henri-Albert), Elève à l'E. S. E., 63 bis, rue du Cardinal-Lemoine, à Paris, 5°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

- Pannier** (Jean-Gabriel), Ingénieur des Arts et Manufactures, Elève à l'E. S. E., 80, boulevard de Port-Royal, à Paris, 5°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Pedone** (Henri-Emile), Elève à l'E. S. E., 27, rue de Fleurus, à Paris, 6°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Péras** (Lucien-Jules-Eugène), Elève à l'E. S. E., 14, rue Duphot, à Paris, 1°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Picard** (Maxime-Félix-Benoît), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 10, rue Mélingue, à Paris, 19°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Ploin** (Antoine-Gabriel), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 13, rue d'Aulnay, à Livry (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Rabault** (Pierre-Charles-Louis), Ingénieur E. S. M. E., Licencié ès-sciences, Elève à l'E. S. E., 70, rue d'Assas, à Paris, 6°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Roger** (Marcel-Charles), Elève à l'E. S. E., 18, chaussée de l'Etang, à Saint-Mandé (Seine). — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Roulland** (Jean-Alexandre-Jules), Ingénieur A. M., Elève à l'E. S. E., 94, rue de Bagnole, à Paris, 20°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Sicard** (Emile-Joanny), Lieutenant de vaisseau, Elève à l'E. S. E., 13, rue Nicolas-Charlet, à Paris, 15°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Simullin** (Ludovic-Félix-Raymond), Elève à l'E. S. E., 82, rue Claude-Bernard, à Paris, 5°. — Présenté par MM. Janet et C.-F. Guilbert.
- Société d'Electricité du Littoral normand**, 16, rue de la Pépinière, à Paris, 8°. — Présenté par MM. Eugène Geoffroy et A. Cahen.
- Société des Forces motrices de la Vienne**, 16, rue de la Pépinière, à Paris, 8°. — Présentée par MM. E. Geoffroy et E. Bryllinski.
- Sudres** (Pierre-Camille), Elève à l'E. S. E., chez M. Raymond, 59, rue Letellier, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Thierry** (Paul-Marie-Marcelin), Ingénieur à la Compagnie française Thomson-Houston, Elève à l'E. S. E., 59, route de Montston, Le Vésinet (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Touzain** (Pierre-Georges-Marie), Elève à l'E. S. E., 11, rue Ernest-Renan, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Villeneuve** (André-Claude-Georges), Elève à l'E. S. E., 20, rue Dutot, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Vitte** (Emile-Louis), Elève à l'E. S. E., 30 bis, rue de Pontoise, à Bezons (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

LES GRANDS PROBLÈMES ACTUELS DE L'APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE

LES APPAREILS A TRÈS HAUTE TENSION. — LES ISOLATEURS SUSPENDUS. —

LES DISJONCTEURS ULTRA-RAPIDES. — LES DISJONCTEURS SÉLECTEURS

M. VÉDOVELLI. — « Permettez-moi, avant de commencer cette conférence, d'évoquer quelques souvenirs, qui remontent, je ne le dis pas sans mélancolie, à quelque trente-cinq années.

» Il me souvient d'avoir assisté, dans un certain endroit qui s'appelait les « Montagnes russes » et où se trouve en ce moment l'Olympia, au débarquement d'une machine bizarre pour l'époque. C'était une dynamo, construite par la Compagnie américaine Thomson-Houston, donnant du 2 200 volts, et qui alimentait des lampes en série par quarante placées sur les boulevards.

» Dès l'arrivée de la machine, des problèmes se sont posés; j'ai collaboré à la solution de l'un d'eux, qui alors semblait complexe et qui aujourd'hui serait l'enfance de l'art. Il s'agissait simplement de mettre dans chaque candélabre un petit commutateur automatique chargé, sans rompre le circuit, de court-circuiter une lampe. J'ai un frisson rétrospectif au souvenir de la façon dont les isolations étaient faites, tant sur la machine que sur les canalisations, et, en fait, il y a eu des accidents assez nombreux.

» A cette époque, la distribution d'énergie électrique était réalisée d'une façon qui sera, pour beaucoup d'entre vous, une révélation; la Compagnie Popp avait installé, rue Saint-Fargeau, une usine dans laquelle on comprimait de l'air, lequel était ensuite canalisé dans Paris. Les canalisations aboutissaient à des moteurs à air comprimé actionnant des dynamos qui chargeaient des accumulateurs; on distribuait ensuite l'énergie; certes, le kilowatt ne revenait pas bon marché; d'ailleurs, à cette époque, personne n'aurait osé parler de kilowatt, seul l'hectowatt était usuel.

» Des flots, constituant l'embryon des secteurs, étaient créés, et je me souviens avoir, pendant quelque temps, présidé aux destinées de l'un d'eux qui alimentait : le théâtre du Vaudeville, le Café américain et, avec des câbles passés dans les égouts, le Café napolitain et d'autres des environs.

» Comment était fait l'appareillage du moment ? Avec le plus pur empirisme... Alors que déjà le calcul se faisait le principal et le plus précieux auxiliaire des constructeurs de dynamos et de moteurs, l'appareillage, lui, était considéré comme un parent pauvre, auquel on n'attachait aucune importance.

» Un contact se faisait alors en appuyant l'un sur l'autre deux morceaux de métal, les proportions étaient données d'instinct, et il fallait beaucoup de temps et de nombreux déboires pour arriver à des résultats acceptables.

» Ce que je voudrais dire ici, c'est que cette condition d'infériorité de traitement de l'appareillage électrique a toujours subsisté et subsiste encore. S'il est vrai que les bons constructeurs spécialistes sont maintenant nombreux et que les nécessités de leur industrie les ont conduits forcément à passer de l'empirisme à la technique, il n'en subsiste pas moins que pour le grand public, j'entends le grand public électrique, l'appareillage n'est pas l'objet de toute l'attention qu'il mérite ; non seulement on est toujours rebelle à lui consacrer les dépenses nécessaires, mais encore on reste toujours, pour le juger, sous l'influence des vieux errements du passé.

» Ce que je voudrais souligner et faire retenir à tous les jeunes gens qui suivent les cours d'électricité et apprennent à manier les mathématiques avec une dextérité qui fait mon admiration, c'est que le merveilleux instrument qu'ils ont entre les mains peut et doit être employé à l'étude de la construction et de l'emploi de l'appareillage, tout aussi bien qu'à celui des dynamos et des moteurs. Sans doute, l'empirisme a toujours ses droits, tout ne se calcule pas et, dans l'appareillage électrique, la cinématique a un rôle tellement important, que l'intuition et l'essai préalable ne peuvent être négligés ; il ne suffit pas d'être un bon mathématicien pour être un bon constructeur d'appareillage électrique, mais tout bon constructeur doit être doublé d'un mathématicien.

» Si vous voulez bien, nous allons maintenant nous reporter de 15 ans en arrière, en 1907 ; ce souvenir m'est particulièrement agréable parce que c'est une date à laquelle j'ai eu le très grand honneur de faire une communication analogue à celle-ci. J'examinais, en 1907, les grands problèmes de l'appareillage électrique, et vous voyez que je n'abuse pas trop si tous les 15 ans

seulement je sollicite votre attention; j'espère dans 15 ans pouvoir recommencer, si vous voulez bien me le permettre.

» J'ai eu la curiosité de relire cette communication et j'ai constaté avec surprise, que nombre des problèmes que nous allons examiner ce soir s'étaient déjà posés et s'étaient posés dans des conditions presque analogues à celles d'aujourd'hui; seule l'échelle différait peut-être, notamment en ce qui concerne les interrupteurs à huile, qui sont l'objet maintenant, vous le savez, de sérieuses recherches et d'une très grande attention.

» En ce qui concerne les interrupteurs à huile, j'ai constaté que, déjà à cette époque, je signalais l'importance de certains facteurs, dont on ne se préoccupait pas du tout à ce moment-là, et dont on ne se préoccupe encore pas suffisamment, aujourd'hui : celui, par exemple, qui concerne la pression statique de l'huile dans les appareils. Je signalais certains dispositifs qu'il me paraissait intéressant d'adopter, certains l'ont été depuis ; j'aurai l'occasion d'y revenir.

» Nous allons maintenant, après cette digression, entrer dans le vif de notre sujet, mais celui-ci est tellement vaste qu'il est nécessaire, tout d'abord, de le subdiviser suivant un plan que je m'efforcerai de suivre.

» Ces subdivisions sont les suivantes :

» 1° La très haute tension, comprenant elle-même les lignes et les isolateurs, les interrupteurs à huile, les postes et les sous-stations en plein air ;

» 2° La sélection ;

» 3° Les sous-stations automatiques ;

» 4° La protection contre les flash et les disjoncteurs à rupture rapide.

LA TRÈS HAUTE TENSION.

» Ces quelques mots représentent tout un programme; que l'on ne croie pas, toutefois, que c'est d'aujourd'hui seulement que l'on se préoccupe de cette question. Permettez-moi de faire passer sous vos yeux la vue d'un interrupteur à huile que nous avons eu l'occasion de faire figurer en 1911 à l'exposition de Turin, où une transmission d'énergie à 110 000 volts avait été installée par nous, avec la collaboration de la Société industrielle des Téléphones et de la Société Gramme.

» La Société industrielle des Téléphones s'était déjà attelée à cette époque avec succès à un problème extrêmement difficile, qu'on commence seulement à résoudre pratiquement aujourd'hui, celui des câbles à très haute tension.

» Nous avons vu en effet, récemment, qu'on arrive d'une façon pratique à faire des câbles à 45 000 et 60 000 volts et qu'on envisage très sérieusement la possibilité d'en faire à 90 000 volts.

» Je dois dire qu'à l'exposition de Turin, la Société industrielle des Téléphones construisit un câble qui résistait à 110 000 volts. Ce câble, pendant toute la durée de l'exposition, a assuré une transmission d'énergie qui n'était pas considérable, mais qui était effec-

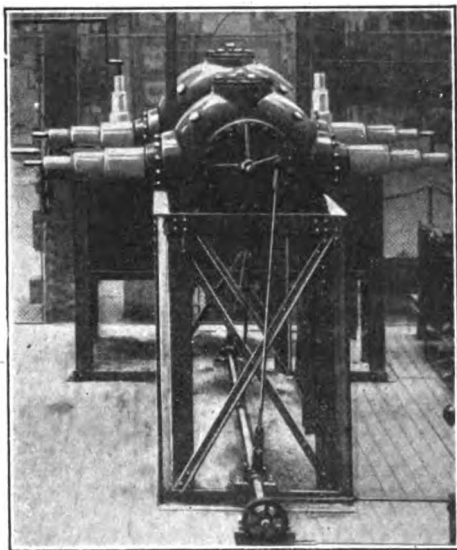


Fig. 1. — Interrupteur à huile à 110 000 volts
de l'Exposition de Turin de 1911.

tive et que nous avons rendue tangible en lui faisant alimenter en série 1 000 lampes à 110 volts ; c'était un moyen de parler aux yeux et de montrer qu'il y avait bien 110 000 volts.

» La Société Gramme avait fourni le transformateur ; nous étions intervenus pour les interrupteurs à huile et pour un système d'isolateurs suspendus. On voit donc que l'idée de la très haute tension n'est pas complètement nouvelle ; déjà en 1911, il y a quelque onze ans, une transmission d'énergie à 110 000 volts avait fonctionné.

» Vous voyez ici deux interrupteurs de taille différente qui étaient installés à Turin; tous deux étaient construits pour 110 000 v, mais l'un d'eux avait une puissance de rupture de 25 000 kv-A, et l'autre de 35 000 kv-A; la pression de l'huile était statique et maintenue à 6 kg:cm².

» C'est presque un lieu commun de dire que l'électricité est à ses débuts. Nous le disions déjà il y a 35 ans. Je crois que nous pouvons le dire encore aujourd'hui, et que nous le dirons dans quelques années, tellement le développement de cette industrie peut être grand.

» Où s'arrêtera-t-on dans la voie des tensions ? On ne saurait le dire. Vous avez entendu parler d'essais qui se monteraient à 1 million de volts. Je serais bien surpris qu'on en arrivât à des tensions aussi élevées pratiquement. C'est qu'en même temps qu'on monte en tension on est obligé, pour limiter les pertes par effluves ou effet corona, d'augmenter le diamètre des conducteurs, si bien que, par des considérations d'ordre économique, on est obligé de monter aussi en importance. Et, par exemple, une transmission à 1 millions de volts, en admettant qu'elle soit réalisable, ce qui n'est pas démontré d'ailleurs, ne se concevrait guère que pour un million de kilowatts.

» Je ne crois pas que jamais on puisse condenser des puissances aussi considérables; il est probable qu'on s'arrêtera aux environs de 200 000 ou 300 000 volts, tout au moins en France, sauf si l'on envisage la possibilité d'amener l'énergie du centre de l'Afrique au milieu de la France, ce qui n'est pas utopique. Mais, en restant dans les environs de 200 000 volts, je crois que nous serons dans une mesure moyenne.

» Tout d'abord, nous appellerons très haute tension ce qui dépasse 75 000 volts. La pratique courante atteint 120 000 à 150 000 volts, et nous aurons prochainement dans l'Ouest de l'Amérique des installations à 220 000 volts.

» Des lignes en elles-mêmes, je ne vous dirai pas grand'chose. Il y a plusieurs moyens de faire une ligne, elle peut être économique ou coûteuse. Les Américains, qui ont une grande avance sur nous, emploient les deux moyens. Il est courant en Amérique de trouver des lignes à 100 000 volts sur des poteaux en bois ; je vais vous montrer une vue d'une ligne semblable faite d'une façon rudimentaire (fig. 2 a).

» Voici une ligne qui est analogue à celle que nous avons éta-

blie pour l'Exposition de Turin ; c'est une ligne à 70 000 volts, faite avec des maillons et des chapeaux métalliques ; elle fonctionne depuis cinq ans en Espagne, dans la région minière de Penarroya (fig. 2 b).

» Voilà un type de ligne caractéristique des constructions américaines. Vous voyez de grands pylônes qui donnent à ceux d'entre vous qui n'ont pas encore eu l'occasion d'étudier ces questions,

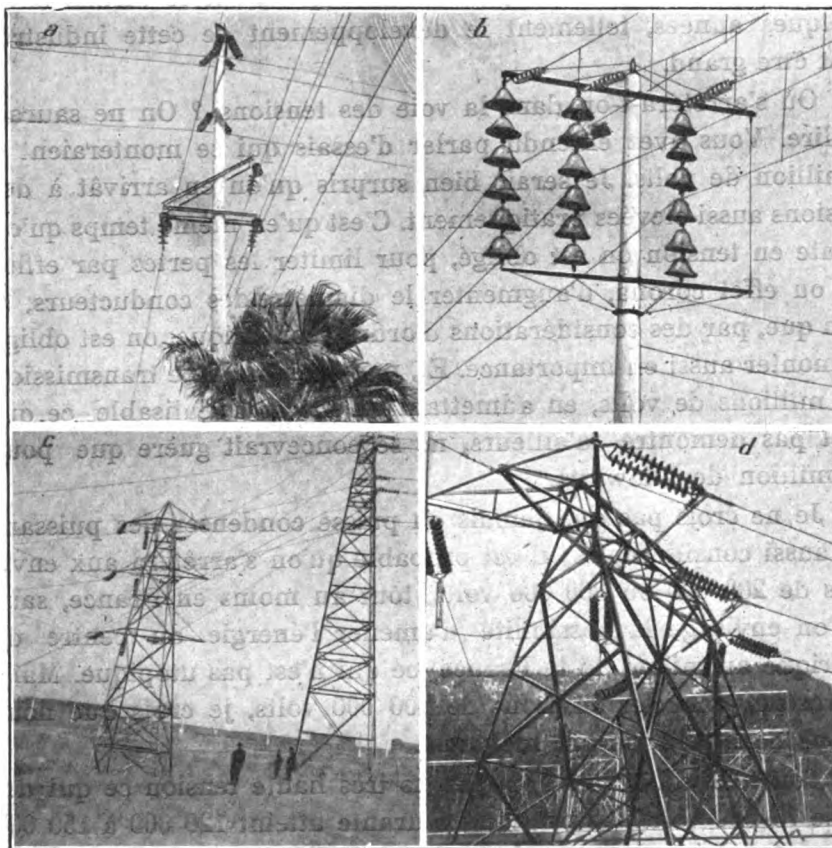


Fig. 2. — a, poteau en bois pour ligne à 100 000 volts. — b, suspension de ligne à 70 000 volts à maillons et chapeaux métalliques. — c, pylônes américains. — d, pylone d'ancrage pour ligne à 150 000 volts.

une idée de la façon dont les grands transports d'énergie sont réalisés en Amérique (fig. 2 c).

» Je vous signale qu'en France, et en Amérique d'ailleurs, on s'est peu occupé de l'emploi du ciment armé pour les grands transports d'énergie ; en quoi on a eu tort, je crois.

» Les pylônes en fer donnent lieu, en effet, à un très grand

entretien; il y a donc un intérêt énorme à employer des pylônes en ciment armé. Le gros problème à résoudre était celui de la construction, des essais ont été effectués et je signale aux personnes que la question intéresse que des pylônes en ciment armé ont été coulés verticalement sur place, jusqu'à une hauteur de 20 à 25 mètres ; on y est arrivé facilement.

» Voici un pylône d'ancrage assez intéressant, il est à 150 000 volts et va prochainement être transformé pour servir à 220 000 volts (fig. 2 d).

» C'est tout ce que je vous dirai de la question des lignes ; je vais vous entretenir maintenant de celle des isolateurs.

» Dans les lignes à haute tension en général, la question des isolateurs est une de celles qui sont le plus dignes d'attention.

» Quand il s'est agi de monter en tension, jusqu'à 75 000 volts, on n'a pas rencontré de difficultés insurmontables; on a continué à employer l'isolateur classique en forme de parapluie, auquel on a ajouté une, deux, trois cloches successives ; déjà, à cette tension, les dimensions deviennent considérables, l'isolateur est fragile et le coefficient de sécurité, faible.

» Aussi, dès le début, l'idée est venue, et je vous ai montré par un exemple qu'elle était venue il y a une douzaine d'années, de mettre des isolateurs en chapelet.

» Les isolateurs suspendus se subdivisent en deux grandes catégories. Dans les uns, des trous s'entrecoupant, sont creusés dans la masse de la porcelaine; des attaches, soit souples, soit rigides, se croisent et forment anneaux, en sorte que si la porcelaine n'existait pas l'ensemble des attaches formerait une véritable chaîne.

» Dans la deuxième catégorie, les isolateurs sont reliés les uns aux autres au moyen de pièces qui comportent un scellement. On se rend compte à priori de l'avantage du premier système qui, même en cas de bris d'un élément, empêche la ligne de tomber et la maintient avec un isolement un peu diminué, c'est vrai, mais suffisant quand même.

» Les Américains, après plusieurs essais, se sont arrêtés à différents types qui se résument à quatre principaux ; je vais les mettre sous vos yeux; pour chacun d'eux la photographie représente une chaîne complète, un élément détaché et la coupe de l'un d'eux.

» On a eu beaucoup de déboires avec les chaînes suspendues. Il y a encore peu de temps, deux ans par exemple, presque tous les

exploitants américains (ceux qui disaient leur opinion) admettaient qu'une ligne se trouvait remplacée tous les cinq ans; les isolateurs claquaient et, au bout d'un certain temps, il n'y avait plus dans la chaîne un nombre suffisant d'éléments assez bons pour qu'elle tienne. L'entretien, dans ces conditions, était très onéreux. Ces accidents étaient attribués à différentes causes. Je dois vous dire, cependant, pour être juste, que les fabricants ont perfectionné leur construction, que les isolateurs se sont peut-être habitués à remplir l'office auquel ils étaient destinés, car maintenant, en somme, les causes d'accidents, tout en subsistant, sont devenues plus anodines, et les ruptures de chaînes d'isolateurs sont limitées. En sorte que les exploitants admettent qu'ils ne remplacent plus, par an, que 2 pour 100 des éléments.

» Il est probable que, d'ici peu de temps, les isolateurs seront encore améliorés et qu'on aura toute satisfaction.

» Quoi qu'il en soit, à l'heure actuelle, on peut dire que les isolateurs donnent une satisfaction suffisante, surtout si l'on prend la pratique américaine, qui, malheureusement, s'introduit peu en France, ce qui est regrettable, et qui consiste à monter deux lignes à haute tension marchant en parallèle, de sorte qu'en cas d'accident survenant à une ligne, l'exploitation n'est arrêtée que pendant un temps très court.

» Quelles sont les raisons qui font que les isolateurs claquent ? On a mis en avant deux causes principales : le vieillissement de la porcelaine et la répartition des potentiels dans la chaîne.

» En ce qui concerne le vieillissement, je dois vous dire que cette raison n'existe pas ; c'est une histoire que l'on a racontée et, quand j'ai interrogé les Américains sur ce sujet, j'ai dû constater qu'ils ne parlaient pas du vieillissement de la porcelaine, mais surtout du vieillissement de l'isolateur. On appelait vieillissement, cette constatation qu'au bout d'un certain nombre de mois (que les isolateurs soient posés ou en magasin) on trouvait à l'essai des fentes.

» Il est un fait qui résulte d'expériences qui ont été réalisées, et de l'avis de techniciens français qui connaissent très bien la question de la porcelaine, c'est que la porcelaine en elle-même est un élément stable, et qu'elle ne peut pas vieillir. Lorsqu'un isolateur est bon, il reste bon; la porcelaine peut vivre un nombre d'années considérable, elle reste semblable à elle-même.

» L'explication de ces fentes, de ces criques et de ce soi-disant vieillissement est très simple; on a construit des isolateurs consti-

tués par de la porcelaine et des éléments métalliques réunis par des scellements; souvent les formes de ces isolateurs n'avaient pas été étudiées d'une façon judicieuse, on n'avait pas suffisamment tenu compte des alternatives de chaud et de froid et des différences de dilatation qui en résultaient; il y avait heurts, travail interne souvent considérable et la porcelaine cédait.

» Il suffit donc d'adopter de bonnes formes, d'observer quelques règles dans l'étude des isolateurs et enfin d'avoir de la porcelaine vitrifiée à point pour avoir toute sécurité.

» Dans un isolateur de suspension, on doit éviter les scellements de pièces métalliques qui imposent, par suite des différences de coefficient de dilatation, des efforts parfois considérables à la porcelaine ; il est également important d'éviter de faire travailler la porcelaine à la traction, c'est pourquoi la disposition que je préconisais tout à l'heure des isolateurs, comportant deux trous se croisant dans la porcelaine, de façon à ce que les attaches constituent véritablement les maillons d'une chaîne, est de beaucoup la plus rationnelle, puisque la portion de porcelaine comprise entre les armatures est soumise uniquement à des efforts de compression; de plus, ce modèle ne nécessitant aucun scellement, les dilatations peuvent se faire librement et sans aucun danger.

» Reste la question d'inégalité de répartition des potentiels ; c'est de beaucoup la plus importante.

» On constate, en effet, à l'expérience (je vous montrerai tout à l'heure à l'aide de quel appareil très simple) que les potentiels ne se répartissent pas d'une façon uniforme le long de la chaîne ; les éléments d'extrémité, principalement celui placé du côté de la ligne, sont soumis à des différences de potentiel plus grandes que les autres, et par conséquent travaillent davantage; dans ces conditions, il est logique d'admettre qu'ils sont susceptibles de claquer plus tôt.

» Il semble bien, en effet (je dis: il semble, parce que tout le monde n'est pas d'accord sur ce point), qu'il y ait là une des causes de claquage des isolateurs.

» En général, les exploitants américains l'admettent; en France et en Europe on est plus sceptique sur ce point ; cependant, il apparaît à tout le monde qu'un isolateur, qui, d'une façon constante travaille avec une marge de sécurité inférieure à celle de ses voisins, a plus de chance que ceux-ci d'être détérioré. Ces études de la répartition des potentiels le long d'une chaîne sont assez

difficiles à faire, diverses méthodes ont été employées ; il en existe une dont je vous parlerai tout à l'heure qui est extrêmement simple ; au préalable, je voudrais vous montrer différents types d'isolateurs américains (fig. 3 a, b, c, d) et ceux qui ont été créés par nous pour répondre aux objections formulées à l'encontre de ces derniers (fig. 3 e et 3 f) :

Modèles de grands réseaux.				
TYPE	ARCS A SEC tension en volts	ARCS SOUS DOUCHE tension en volts	ARCS DANS L'HUILE tension en volts	EFFORT DE RUPTURE MÉ- CANIQUE kg
à grande jupe	100 000	50 000	120 000	5 000
à petite jupe..	55 000	30 000	120 000	5 000

Modèles ordinaires.				
TAILLE	ARCS A SEC tension en volts	ARCS SOUS DOUCHE tension en volts	ARCS DANS L'HUILE tension en volts	EFFORT DE RUPTURE MÉ- CANIQUE kg
α	40 000	20 000	70 000	1 800
β	50 000	28 000	80 000	3 000
γ	55 000	33 000	85 000	2 200
δ	70 000	45 000	90 000	2 000

» Voici un premier modèle que nous fabriquons et qui est destiné à l'équipement des réseaux importants, il se fait avec jupes courtes (fig. 3 e) et avec jupes longues (fig. 3 f), et les directives qui ont présidé à son étude sont les suivantes :

- » 1° Ne pas faire travailler la porcelaine à la traction ;
- » 2° Supprimer complètement les scellements et laisser aux pièces métalliques toute liberté pour leur libre dilatation ;
- » 3° Se réserver toujours une marge de sécurité entre la tension de perforation et la tension d'amorçage d'arcs extérieurs ;
- » 4° Avoir des formes et des épaisseurs de porcelaines permettant de résister avec sécurité à des efforts de traction considérables ;
- » 5° Rechercher des formes d'attaches évitant les fortes densités électrostatiques et par suite la formation d'effluves.

La première de ces conditions a été réalisée d'une façon fort

simple, ainsi qu'on peut s'en rendre compte en examinant la coupe dessinée en bas des figures 3 *e* et 3 *f*; la porcelaine se trouve comprimée entre les deux armatures qui travaillent à la façon des maillons d'une chaîne; s'il y a bris de la porcelaine, la ligne reste suspendue.

» La deuxième condition se trouve solutionnée d'elle-même par le fait que la première se trouve satisfaite; avec cette disposition: les armatures sont absolument libres et n'ont besoin d'aucun scellement, elles peuvent donc être soumises aux plus violentes alternatives de chaud et de froid sans que les dilatations et les retraits puissent avoir la moindre influence sur l'isolateur.

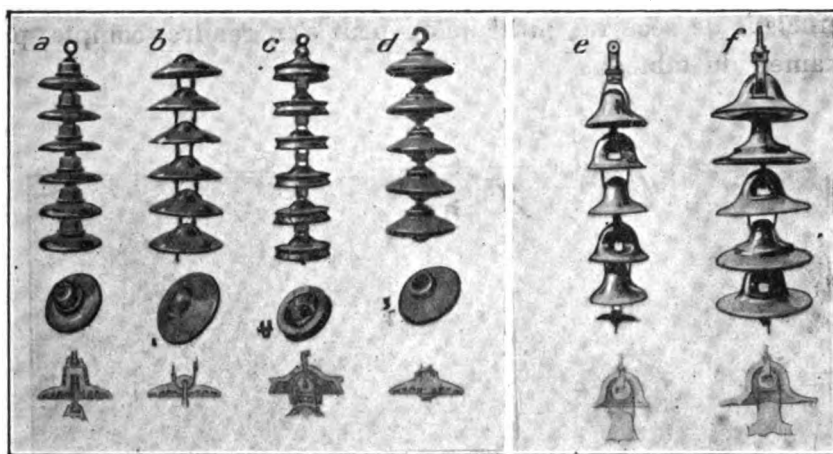


Fig. 3. — *a, b, c, d*, différents types américains ; *e*, type français à jupe courte ; *f*, type français à jupe longue.

» La troisième condition est une question de forme et de proportion à donner à l'isolateur, elle n'est pas la plus facile à résoudre; nous y sommes cependant arrivés ainsi qu'on peut s'en rendre compte en examinant le tableau ci-dessus. Le maillon « Grands Réseaux » à petites jupes est le premier que nous avons créé, il offre un très large coefficient de sécurité, car sa tension d'arcs à sec étant de 55 000 volts, sa tension de claquage dans l'huile est de 120 000 v; sous douche, la marge est plus grande encore, car l'arc s'amorce à 30 000 volts et ces marges de sécurité, à mon avis, devraient toujours être adoptées; toutefois, pour satisfaire à la mode, nous avons été conduits à créer le modèle à grandes jupes, dont la partie centrale est semblable à celle du premier, mais dont les dimensions de jupes ont été sensiblement augmentées, permettant

ainsi de pousser plus loin les limites d'emploi, mais en abaissant en même temps le coefficient de sécurité.

» La quatrième condition a été résolue avec succès, puisque les charges de rupture de ces pièces ne sont pas inférieures à 5 000 kilogrammes.

» Pour satisfaire à la cinquième et dernière condition, nous avons constitué nos attaches par des pièces de larges dimensions, ne présentant pas d'arêtes vives.

» La chaîne constituée avec nos modèles ordinaires α , β , γ et δ découle des mêmes conceptions, mais les éléments qui la composent, éléments qui se font en 4 tailles différentes, correspondent à des conditions d'emploi plus modestes, mais toujours avec un bon coefficient de sécurité, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par l'examen du tableau.

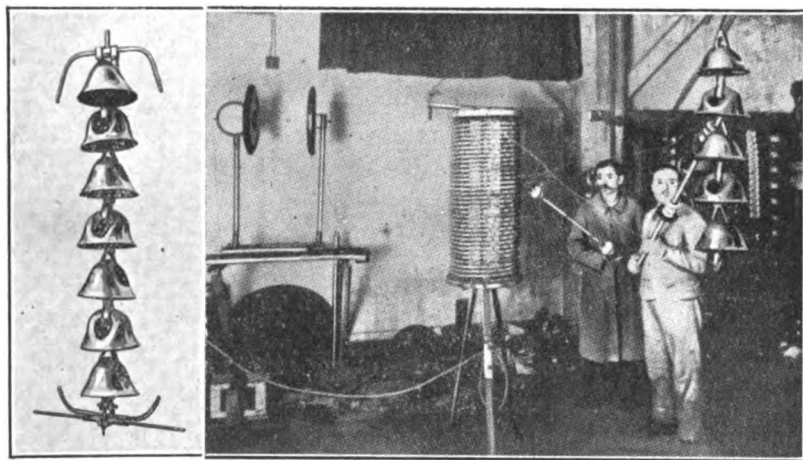


Fig. 4. — Chaîne d'isolateurs et essai de cette chaîne par la méthode de Ryan.

» Je vous ai parlé tout à l'heure de la difficulté qu'on éprouvait pour mesurer les différences de potentiel entre isolateurs, c'est un problème très délicat et, pour le solutionner, nous nous sommes ralliés aux méthodes du professeur Ryan, de l'Université de Stanford.

» Par cette méthode, on étudie la répartition du champ, ainsi qu'on peut s'en rendre compte par l'examen de la figure 4 ;

l'appareil est constitué essentiellement par un potentiomètre et 2 perches de manœuvre; ce potentiomètre est réalisé de la façon suivante: un tube de caoutchouc très long et enroulé en spirale sur un support isolant est maintenu plein d'eau et parcouru par un très petit courant électrique de façon à éviter l'échauffement ; l'eau arrive par la partie inférieure au moyen d'une canalisation reliée à la terre et s'écoule goutte à goutte par la partie supérieure, de façon qu'il n'y ait pas continuité et, par conséquent, passage du courant ; tout le long du tube, à intervalles réguliers et rapprochés, se trouvent des petites vis venant effleurer le liquide intérieur et former contact. On se rend compte immédiatement que cet appareil, branché entre une ligne sous tension et la terre, sera parcouru par un certain courant et que, la section du tube de caoutchouc étant constante et régulière, la chute de tension sera uniforme tout le long du tube et que, par suite, nos contacts correspondront à des points de potentiel bien déterminés.

» Si nous plaçons également la chaîne à prospecter, en dérivation entre la ligne et la terre comme le potentiomètre, et que à l'aide de perches isolées nous touchions simultanément un maillon et un contact, une aigrette jaillira, d'autant plus lumineuse que l'écart entre les deux tensions sera plus grand ; en déplaçant la perche dans un sens ou un autre, on arrive à trouver un point où il n'y a plus production d'aigrette, c'est que ce point est au même potentiel que la partie du maillon essayé.

» Evidemment, l'aigrette n'est pas extraordinairement lumineuse; mais en faisant l'obscurité dans la pièce, on l'apprécie très bien.

» L'appareil que nous avons fait construire et qui est visible sur la photographie, permet d'apprécier 500 volts, étant branché sur 100 000 volts, c'est une précision déjà remarquable.

» Nous allons examiner de quelle façon se répartit le champ. Supposons un diélectrique placé comme indiqué sur la figure 5 et soumis à une différence de potentiel; ce diélectrique peut être homogène ou constitué par une chaîne d'isolateurs; les points que nous avons mis figurent les isolateurs et nous avons mis sept éléments entre pôles isolés de la terre et supposé que l'arc s'amorce à 350 000 volts; à cette tension la répartition est absolument régulière et chaque élément est soumis à une contrainte diélectrique de 50 000 volts; mais si nous examinons les répartitions pour différentes autres tensions, nous remarquons qu'au fur et à mesure

que la tension s'abaisse la dyssymétrie s'accroît et que le pourcentage pris par les éléments de tête va en augmentant (fig. 5).

» Ceci fait toucher du doigt une erreur souvent commise et de nature à troubler bien des esprits, on parle de répartition de potentiel dans une chaîne sans spécifier à quelle tension est mesurée

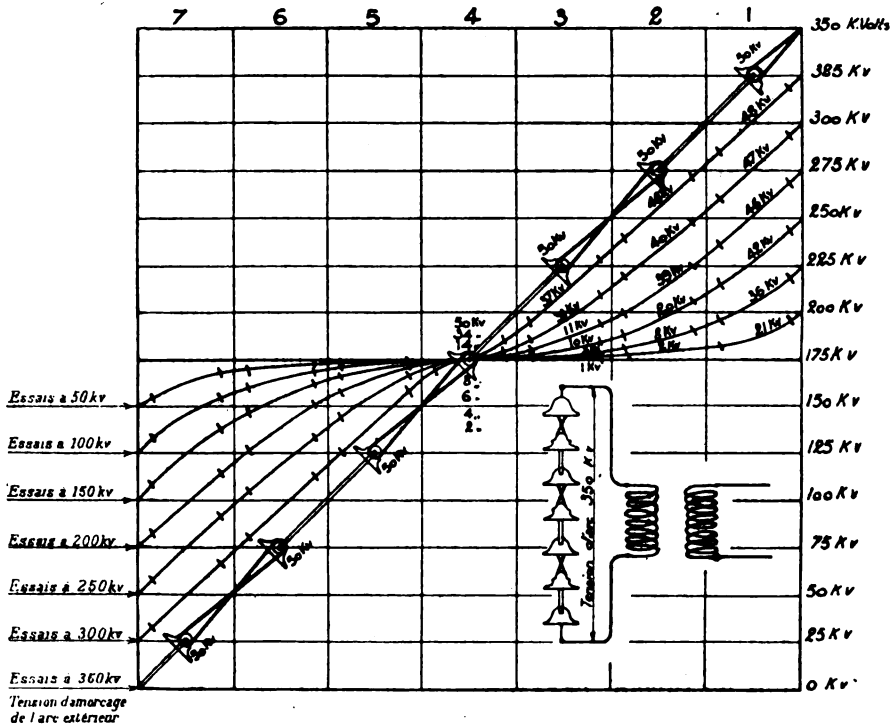


Fig. 5. — Graphique de répartition des tensions.

cette répartition de potentiel ; or, si on la mesure à une tension très faible, on s'aperçoit que les premiers éléments travaillent seuls, tandis que, si on la mesure tout près du point d'amorçage, on constate que tous les éléments travaillent d'une façon identique.

» Il est donc très important de définir, dans l'étude que l'on a faite de ces questions, la tension à laquelle est exécuté l'essai.

» Voici une autre courbe qui permet de trouver la charge pour un point quelconque du diélectrique, cette courbe est la traduction sous une autre forme de la précédente (fig. 6).

» Suivant la nature des diélectriques et leur épaisseur, la courbe varie en réduisant proportionnellement les ordonnées. La charge

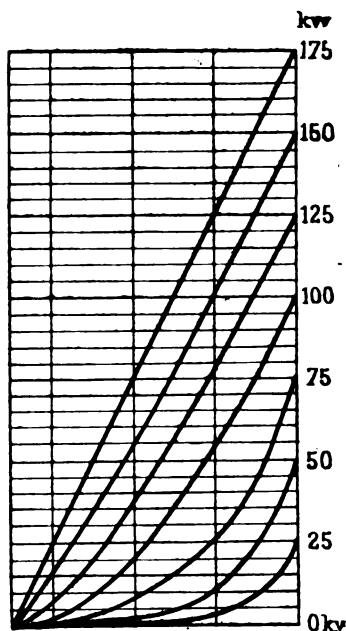


Fig. 6. — Courbe des tensions en fonction de la charge.

est d'autant plus grande vers les extrémités que la tension est plus basse (fig. 6).

» Voici une autre expérience faite avec une chaîne de 7 mail-
lons suspendue à un poteau; en mettant la tension entre la ligne
et le poteau relié cette fois à la terre, la répartition des potentiels,
à la tension normale d'emploi et en partant de l'isolateur de ligne,
est la suivante : 49 000 v, 10 000 v, 5 000 v, 4 000 v, 3 000 v,
4 000 v, 25 000 v (fig. 7).

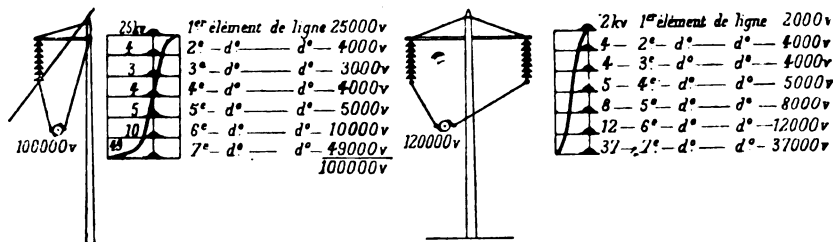


Fig. 7. — Graphique de répartition des tensions.

» L'élément près de la ligne travaille à 49 000 volts et celui près de la terre à 25 000 volts, ce qui fait toucher du doigt l'importance de choisir tout particulièrement le premier isolateur ou d'en prendre un de qualité spéciale.

» Si, au contraire, nous faisons l'essai dans un système tel que celui représenté sur la même figure 7 où nous aurions deux chaînes et où le point neutre serait la terre, nous aurions une répartition presque entièrement faite sur l'élément de ligne et qui donnerait approximativement 37 000 volts pour le premier maillon, compté à partir de la ligne, c'est-à-dire dans l'ordre inverse de celui marqué sur la figure 7; 12 000 volts pour le deuxième, 8 000 v, 5 000 v, 4 000 v, 3 000 v, 2 000 v respectivement pour les suivants.

» Les chiffres que nous venons de citer sont à peu près exacts, ils sont admis d'une façon unanime ; les quelques divergences que l'on trouve peuvent provenir, soit de ce que les mesures de répartition de potentiel n'ont pas été faites à la même tension, soit de ce que certains constructeurs américains donnent des chiffres un peu plus bas.

» Mais, en réalité, ces courbes établies dans des conditions normales correspondent à la vérité. On pourra peut-être discuter, dire que ce n'est pas 37 mais 30, que ce n'est pas 50 mais 45; il n'en est pas moins vrai qu'il faut admettre que le premier isolateur prend à lui tout seul environ 40 pour 100 de la tension, et l'on peut admettre que les répartitions moyennes en centièmes de la tension totale dans une chaîne d'isolateurs et en fonction du nombre d'éléments sont les suivantes :

Répartition sur les éléments en centièmes de la tension totale.							
Nombre des éléments	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
2	54	46					
3	51	17	32				
4	50	14	8	28			
5	50	12	6	5	27		
6	50	11	5	4	4	26	
7	49	10	5	4	3	4	25

» Quelle est la responsabilité, dans les claquages d'isolateurs

de cette répartition différente des potentiels, c'est un point sur lequel il est difficile d'être fixé. Mais il apparaît, à l'observateur impartial, que, vraiment, cette répartition est une des causes de la rupture des isolateurs.

» En Europe, en Espagne, en France, les exploitants ont contesté cette cause et dit que les isolateurs ne claquaient pas davantage qu'ils fussent près ou loin de la ligne.

» Je crois que c'est tout simplement parce que, dans les lignes qui existent dans ces pays, la tension est relativement basse. Dans les lignes américaines et surtout dans les grandes lignes à 120 000 volts ou 150 000 volts, les éléments de tête ont des claquages beaucoup plus fréquents que les autres.

» Quels moyens ont été proposés pour remédier à ces maux ? L'un d'eux consiste à mettre une couronne de garde qui abaisse le potentiel de l'élément voisin de la ligne à la valeur de celui des éléments supérieurs ; ce procédé est, paraît-il, efficace ; mais, à mon avis, les remèdes de cette nature présentent l'inconvénient de créer une chaîne dyssymétrique, car si ces éléments de ligne viennent à claquer, les autres ne sont plus protégés.

» Nous avons pensé qu'il existait une autre solution, que nous allons soumettre, mais auparavant, il serait bon d'examiner quel est le nombre d'éléments optimum dont doit se composer une chaîne.

» Est-il préférable de mettre un grand nombre de petits éléments, ou un petit nombre de grands éléments ? Si les potentiels se répartissaient régulièrement, la première solution serait certainement la meilleure, car le calcul des probabilités montre qu'en cas d'un isolateur défectueux, la sécurité serait plus grande ; mais avec des répartitions qui peuvent atteindre 40 pour 100 sur le premier élément, il n'en est plus de même et il semble qu'une chaîne de 3 éléments, dont chacun serait capable de tenir individuellement la tension du réseau offrirait un coefficient de sécurité plus grand ; or, on construit, nous en avons montré des photographies tout à l'heure, des éléments qui résistent à 120 000 volts et nul doute que l'on arrive à monter encore un peu plus.

» Nous allons maintenant en revenir à la question de protection des chaînes contre les claquages.

» Puisque tout isolateur est construit pour résister à une tension déterminée, il y a un moyen simple de l'empêcher de claquer : c'est de s'arranger de manière à ce qu'il ne puisse pas être sur-

chargé. Si nous mettons à chaque isolateur une sorte de limiteur de tension, nous serons certains que, quoi qu'il arrive, cette charge ne sera pas dépassée et notre isolateur sera conservé.

» Cette conception nous a conduit à munir des isolateurs, analogues à ceux que je vous montrais tout à l'heure (ces isolateurs pourraient être aussi du type américain), d'un chapeau métallique avec des éclateurs circulaires.

» Ces éclateurs sont mis à une distance telle que l'arc s'amorce à la même tension à sec et sous douche, et à une valeur correspondant à peu près au tiers de la tension de percement de l'isolateur; de cette façon, il est protégé parfaitement, la tension ne pouvant jamais monter à une valeur dangereuse pour sa conserva-

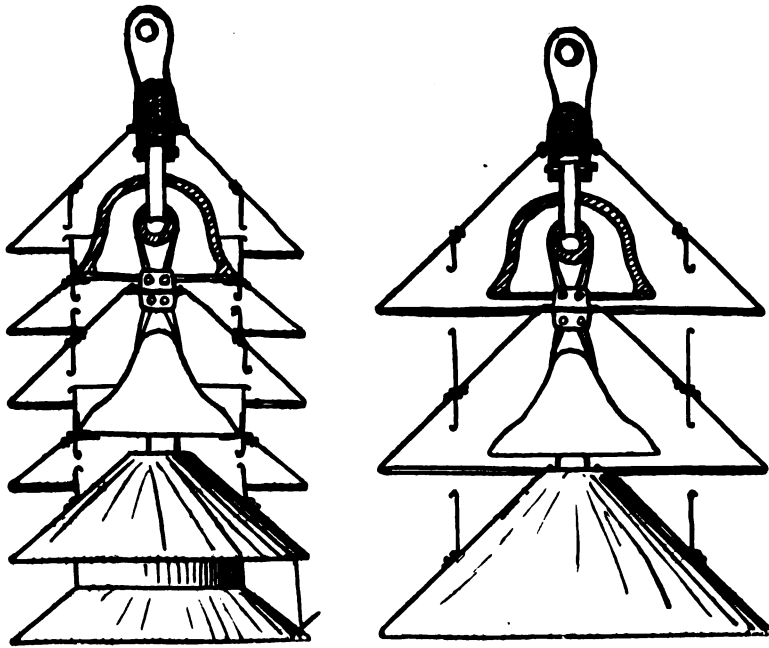


Fig. 8. — Type de chaînes à maillons avec chapeaux métalliques.

tion puisque l'arc, au lieu de passer à travers la porcelaine, a un chemin plus court : c'est de jaillir entre les éclateurs disposés à cet effet. Je puis vous donner quelques chiffres relatifs à des chaînes équipées avec ce dispositif (fig. 8).

» Le dessin vous représente une chaîne constituée avec des isolateurs analogues à ceux que je vous ai signalés tout à l'heure, les maillons sont de la taille β , les chapeaux métalliques sont mis

par-dessus. Nous avons, avec ces modèles, les résultats suivants : l'arc extérieur des isolateurs s'amorce à 50 000 volts, le percement de la porcelaine se fait à 80 000 volts, les éclateurs sont disposés de telle façon qu'ils peuvent s'amorcer à 30 000 volts; par conséquent, si un élément, par suite d'une surtension, est susceptible d'être soumis à plus de 30 000 volts, l'arc doit s'amorcer entre les éclateurs, et la porcelaine travaille toujours avec un coefficient de sécurité de 2,65.

» L'on peut trouver que ce dispositif présente des inconvénients, notamment celui de diminuer la résistance à l'éclatement de la chaîne entière. Mais il faut bien considérer que, dans n'importe quelle autre chaîne, la résistance à l'éclatement est beaucoup plus faible quand il pleut; c'est ainsi qu'une chaîne qui résiste à sec à 300 000 volts, ne résiste plus, par exemple, qu'à 160 000 ou 170 000 volts quand il pleut; il faut donc admettre que 170 000 volts représentent un coefficient de sécurité suffisant; si donc nous réalisons notre chaîne pour qu'elle ait même coefficient de sécurité à sec et sous douche, la solution est parfaitement technique.

» C'est prendre, il nous semble, le problème sous un jour tout à fait profitable, que de mettre l'isolateur en situation telle qu'il ne puisse pas être surchargé. On sait ainsi que, même s'il y a des surtensions, l'isolateur ne peut pas être fatigué, ce qui n'existe dans aucune autre disposition.

» Il est en outre à remarquer que l'emploi systématique des chapeaux métalliques constitue une protection mécanique très intéressante.

» Voici une chaîne (fig. 9 a) qui est celle que je vous ai montrée en dessin tout à l'heure. Vous voyez les chapeaux métalliques, il peut paraître bizarre de constituer ainsi un isolateur avec de la tôle ou de l'aluminium. Il n'en est pas moins vrai que l'on a ainsi un isolateur qui ne peut pas être percé pourvu que la porcelaine soit de qualité normale.

» Voici un autre modèle, une autre réalisation du même principe (fig. 9 b).

» Les résultats qui ont été obtenus par ces conceptions de chaînes m'ont paru d'autant plus intéressants qu'en réalité l'idée du chapeau métallique n'est pas nouvelle. Nous avons une ligne de 70 000 volts qui fonctionne en Espagne depuis 5 ans et qui est simplement constituée par de petits maillons analogues à ceux qui sont employés en télégraphie sans fil et simplement protégés par

un chapeau métallique. Cette ligne fonctionne dans d'excellentes conditions.

» Nous avons même, dans le Valais, une ligne munie d'un chapeau métallique. La ligne n'est qu'à 35 000 volts, mais elle est en service depuis 12 ans et a toujours bien fonctionné.

» L'isolateur lui-même, qui a une fonction électrique déterminée, peut-il servir obligatoirement de protection contre la pluie ? Je ne le crois pas. Il me semble donc qu'il y a là quelque chose d'intéressant.

» C'est tout ce que je vous dirai pour les isolateurs. Cette question, vitale pour l'électricité, est de celles qui méritent de retenir l'attention de l'ingénieur.

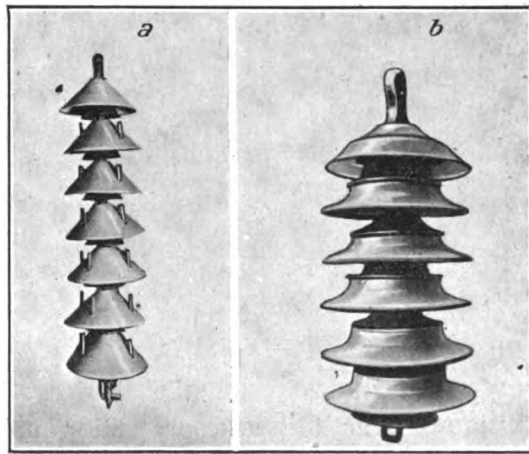


Fig. 9. — Type d'isolateurs à maillons avec chapeaux métalliques.

» Dans l'appareillage, en somme, on a examiné surtout une chose : c'est l'interrupteur ou le disjoncteur. C'est par eux que nous commencerons.

LES INTERRUPTEURS ET DISJONCTEURS A TRÈS HAUTE TENSION.

Les interrupteurs à très haute tension soulèvent des problèmes qui sont surtout des problèmes de réalisation.

» Au-dessus de 75 000 volts, et c'est le cas qui nous occupe, l'accord est unanime sur la formule générale : un bac à huile, des entrées à la partie supérieure d'un couvercle qui recouvre le bac, un ou plusieurs équipages mobiles qui produisent la rupture de haut en bas.

» Alors que, pour des tensions plus basses, certains constructeurs ont encore conservé des dispositifs plus compliqués, tels que des chambres d'explosion, pour les tensions élevées on recherche la plus grande simplicité et nous ne connaissons pas d'interrupteur très haute tension qui fonctionne et qui sorte du schéma que nous venons d'indiquer.

» A vrai dire, la seule dérogation que nous connaissions s'applique à une maison de Los Angeles qui fabrique des interrupteurs à 150 000 volts, dans lesquels la rupture, dans le fond du bac, se fait dans un plan horizontal.

» Un interrupteur très haute tension est forcément un appareil volumineux. Les cotes dépendent d'une constante qui est la qualité diélectrique de l'huile et d'une variable qui est la capacité de rupture.

» On conçoit combien il est difficile de choisir un dimensionnement convenable.

» Les éléments qui influent sur la capacité de rupture d'un interrupteur à huile sont les suivants :

- « A — Distance entre pièces sous-tension et masse;
- » B — Distance de rupture;
- » C — Hauteur d'huile au-dessous des contacts;
- » D — Vitesse de rupture;
- » E — Nombre de ruptures;
- » F — Tension d'emploi.

» Ces éléments influent de façon très variable sur la capacité de rupture ; examiner leur action en détails nous conduirait trop loin; nous allons nous contenter de les résumer brièvement.

» *La distance entre pièces sous tension et masse* influe en permettant un plus ou moins grand développement de la poche gazeuse formée autour des contacts au moment de la rupture.

» *La distance de rupture* permet un plus ou moins grand développement de l'arc; elle est liée à la vitesse de rupture et ne peut pas varier indépendamment de cette dernière.

» *La hauteur d'huile au-dessus des contacts* ou la pression hydrostatique de l'huile est un des facteurs les plus importants, car il contribue à étouffer et à résorber plus facilement l'arc de rupture.

» *La vitesse de rupture* est également un des facteurs les plus importants, car c'est de lui que dépend en grande partie la valeur du travail interne de rupture.

» *Le nombre de ruptures* intervient en facilitant beaucoup l'extinction de l'arc réparti entre plusieurs points.

» *La tension d'emploi* tend à maintenir l'arc entre les contacts qui s'éloignent.

» Connaissant ces divers éléments et la façon relative dont ils agissent, on peut en déterminer les proportions pour un interrupteur normal et évaluer quelle puissance il sera capable d'interrompre.

» J'ai proposé, il y a un certain nombre d'années, une formule qui permet, étant donné un interrupteur déterminé, de dire approximativement le nombre de kilowatts qu'il sera capable de supporter.

» Voici cette formule, elle est empirique. Elle a tout au moins un avantage, c'est de mettre en lumière et de relier par une relation algébrique les éléments principaux qui influent sur la capacité de rupture d'un interrupteur (fig. 10).

» Des expériences vont être tentées prochainement par le Laboratoire central d'Electricité à ce sujet. Nul doute qu'elles contribueront à mettre tout à fait au point cette question, dont on commence à s'occuper d'une façon sérieuse.

» En appliquant cette formule dans une construction quelconque, et en mettant les constantes dans cette formule, on arrive, à peu de chose près, à trouver les chiffres qui sont donnés par les expériences. Nous avons eu l'occasion, personnellement, de faire des essais jusqu'à 10 000 kilovolts-ampères de rupture et nous avons contrôlé également cette formule par des expériences beaucoup plus importantes poursuivies en Amérique, jusqu'à 100 000 kilovolts-ampères. Nous ne sommes pas arrivés à plus de 15 à 20 pour 100 d'écart, le résultat n'est pas déjà si mauvais ; en tout cas, c'est mieux que pas de résultat du tout.

» On pourra critiquer cette formule qui, évidemment, est comme toutes les formules empiriques ; mais elle a certainement un avantage et permet de comparer deux interrupteurs de construction analogue.

» C'est un fait certain que si, toutes choses égales, deux interrupteurs ne varient que par la distance de rupture, on ne se trompera pas beaucoup en comparant l'un à l'autre au moyen de cette formule.

» Nous avons, pour les petites puissances, remplacé le coefficient v de rupture par un coefficient fixe. C'est la courbe qui figure

sur le dessin ci-contre. Nous avons été très secondés, notre tâche a été très facilitée par un appareil construit par la Maison Carpentier et qui est dû à l'initiative de M. Joly. Il permet de mesurer le temps jusqu'au dix-millième de seconde et servait à mesurer la vitesse des obus. En adaptant cet appareil aux pièces mobiles

Calcul de la puissance de rupture des
appareils à rupture dans l'huile.

Formule VEDOVELLI

$$P = \frac{V D \sqrt{H} \sqrt{N} d}{\sqrt{400 + T}}$$

P = Puissance de rupture en kv.-a

V = Coefficient de vitesse de rupture (voir Courbe).

D = Distance de rupture (totalisée en cm.)

H = Hauteur d'huile au-dessus des contacts (en cm)

N = Nombre de ruptures.

d = Plus petite distance entre point de rupture et masse (*d*²)

400 = Constante.

T = Tension maximum d'emploi en volts.

V en fonction de la vitesse moyenne d'éloignement
des contacts.

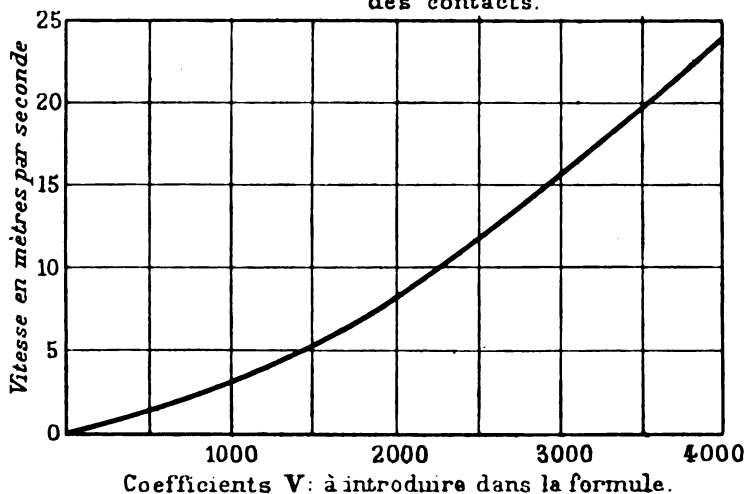


Fig. 10. — Formule empirique donnant le nombre de kilovolts-ampères que peut supporter un interrupteur donné.

d'un interrupteur, on arrive facilement à savoir d'une façon très exacte la vitesse de rupture. Il faut, pour avoir des interrupteurs à huile de grandes puissances, arriver à des vitesses qui atteignent 5 à 10 mètres par seconde, ce qui n'est pas toujours facile à réaliser.

» On n'a pas encore obtenu l'interrupteur pris dans un espace complètement étanche avec pression de l'huile, mais on y arrivera certainement. Depuis vingt ans que j'assiste à la construction de ces interrupteurs, je vois la hauteur de l'huile au-dessus des contacts toujours augmenter. Voici, par exemple ici un pre-

Constantes	Type 15000v	Type 30000v	Type 135000v
D	2 x 4-8 cm.	2 x 8-16 cm.	4 x 26-104 cm.
H	15 cm.	25 cm.	76 cm.
N	2	2	4
d	4 cm.	8 cm.	30 cm.
V	1800	1800	2700
T	15000	30000	135000
Puissance de rupture en kv.A par phase	4400 kv.A	12500 kv.A	235000 kv.A

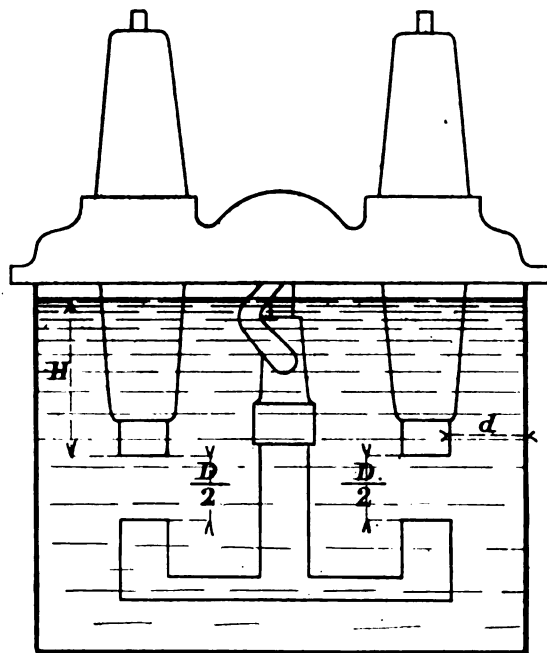


Fig. 11. — Dimensions d'interrupteurs à huile.

mier appareil de 15 000 volts dans lequel l'application des cotes donne 4 400 kilovolts-ampères par pôle.

» Dans un autre appareil, plus gros, nous arrivons à 12 500 kilovolts-ampères et, dans un autre appareil encore, nous arrivons à 235 000 kilovolts-ampères par pôle (fig. 11).

» En attendant mieux, je crois qu'il est très précieux pour l'ingénieur d'avoir une formule qui lui permette tout au moins d'avoir un ordre de grandeur et d'établir une échelle entre différents types d'interrupteurs.

» L'une des grosses difficultés des hautes tensions consiste dans les traversées. Précisément, les déboires rencontrés par les constructeurs ont tenu principalement aux courts-circuits, aux mises à la masse qui se faisaient dans la traversée. Il n'est pas facile, en effet, de faire passer un fil à 75 000, 100 000 ou même 200 000 volts avec des distances raisonnables. Et les électriciens, pendant de longues années, en ont été réduits à enregistrer le nombre de « troubles », comme disent les Anglais, qu'ils ont eus !

» Deux systèmes ont été mis en avant. L'un consistait à superposer des épaisseurs de diélectriques variables, séparés par des armatures métalliques, de façon à constituer des condensateurs en série, et à régulariser la répartition du potentiel de façon à avoir un travail à peu près égal de tous les diélectriques.

» Ces bornes ont permis au début, de faire des interrupteurs à très haute tension.

» Ces bornes à condensateur, coûteuses d'abord, sont difficiles à fabriquer, et il semble maintenant qu'on se rallie à un dispositif plus simple qui consiste à faire une borne creuse dans laquelle on met de l'huile.

» Il y a dix-huit mois, quand j'étais en Amérique, il résultait, d'un avis, que je ne dirai pas unanime, mais presque, que la borne creuse avec de l'huile donne de bons résultats, et que c'est vers elle que doivent se tourner les regards des ingénieurs qui veulent construire des interrupteurs à très haute tension.

» Les appareils dont nous parlons sont rarement de simples interrupteurs, ils doivent le plus souvent être automatiques et fonctionner par excès de débit. On a commencé, un peu parce que c'était la mode, et beaucoup parce que cela semblait plus facile, par mettre une bobine directement sur la haute-tension ; cette bobine agissait au moyen d'une tringle isolante, soit sur un relais, soit sur le déclenchement, mais on y a vite renoncé, surtout pour les appareils d'extérieur, et on emploie maintenant partout un transformateur d'intensité faisant partie intégrante de l'interrupteur. Une difficulté assez sérieuse se présente dans la réalisation de ce transformateur. Un des premiers dispositifs qui est venu

naturellement à l'esprit est celui que vous voyez représenté ici d'une façon schématique (fig. 12).

» Vous avez une colonne creuse pleine d'huile, une barre passe au milieu et, à la distance voulue pour que l'huile ait la puissance diélectrique nécessaire, il y a un tore de fer doux entouré de fil.

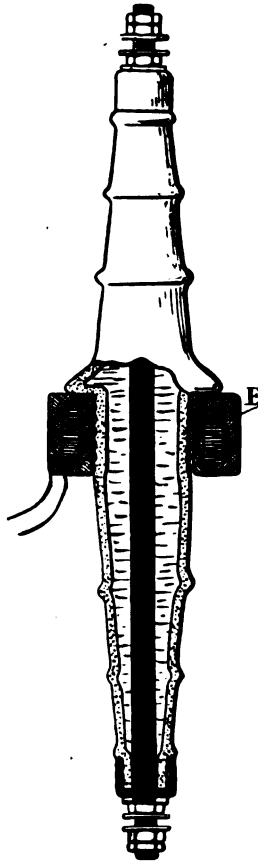


Fig. 12. — Transformateur d'intensité.

C'est la disposition presque unique à laquelle on s'est arrêté en Amérique. Elle a un inconvénient, elle donne une précision très faible et, même en augmentant considérablement le fil, il est difficile d'avoir un transformateur d'intensité au-dessous de 100 ampères. Commencer à fonctionner en disjoncteur à 100 ampères, cela n'est pas suffisant. Nous avons imaginé un autre dispositif, qui consiste à construire un véritable transformateur d'intensité,

ce transformateur d'intensité étant formé de deux tores qui se pénètrent (fig. 13).

» Dans cette disposition, il nous est loisible de mettre autant de tours de fil que nous voulons, et nous avons un transformateur d'intensité dans lequel la précision peut être très grande et l'isolement être obtenu uniquement par l'huile.

» Ce qui a empêché les ingénieurs américains de faire un transformateur d'intensité, ce sont les dimensions considérables que

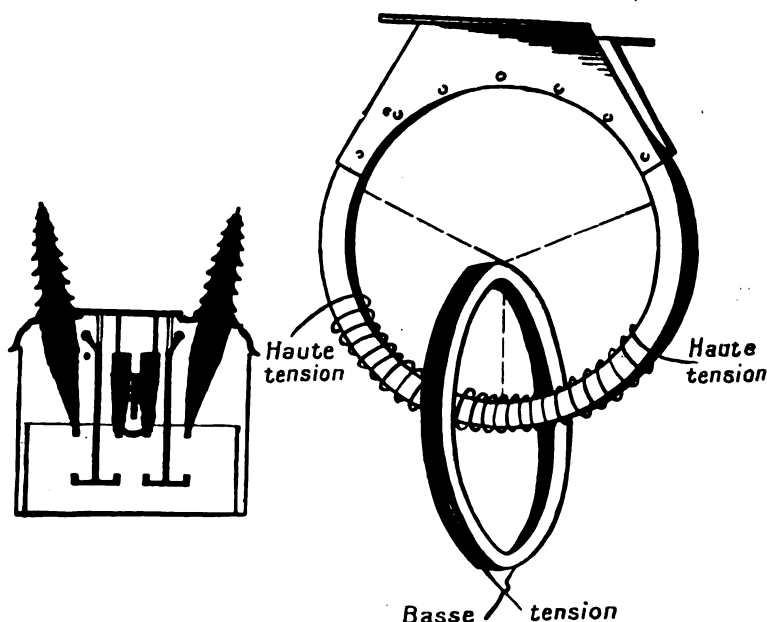


Fig. 13. — Autre dispositif de transformateur d'intensité.

prend l'appareil et, par conséquent, la dépense entraînée. Mais, si l'on consent à mettre le transformateur dans l'intérieur de la cuve de l'interrupteur, à se servir des éléments constructifs de ce dernier, on a une disposition extrêmement économique. Cette disposition donne une précision et une puissance suffisantes pour permettre l'emploi d'appareils de mesure et même de wattmètres ou de compteurs.

» La vue suivante nous montre une borne de traversée à 90 000 volts (fig. 14 a). C'est un modèle que nous avons créé. L'autre vue représente un interrupteur construit pour 60 000 volts, dont vous ne voyez que l'extérieur (fig. 14 c).

Cet appareil, en triphasé, aurait une capacité de rupture de 250 000 kilovolts-ampères, c'est un assez joli chiffre, il a été déterminé à l'aide de notre formule et est de même ordre de grandeur que les chiffres donnés par les Américains pour des appareils analogues.

» Cette nouvelle photographie vous représente un interrupteur à 135 000 volts, vu de l'intérieur (fig. 14 b).

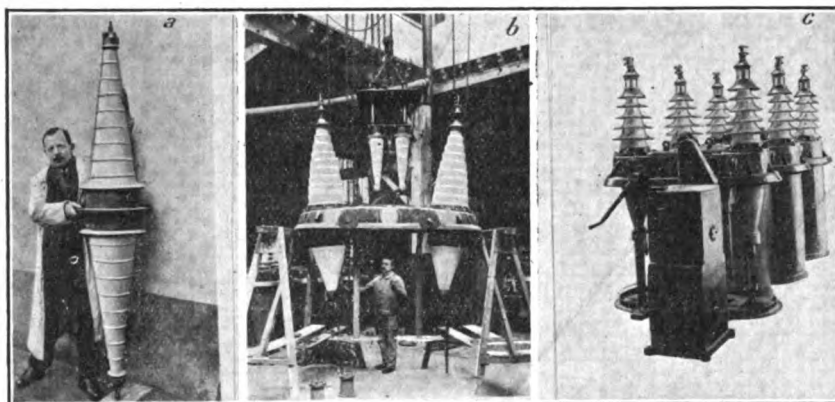


Fig. 14. — a, borne de traversée à 90 000 volts. — b, interrupteur à 135 000 volts. — c, interrupteur à 60 000 volts.

» Cet appareil est en cours de montage dans nos ateliers; les entrées sont en place et le transformateur d'intensité est suspendu au crochet du pont roulant, et prêt à être mis en place. On voit la simplicité du montage. Cet interrupteur aurait, en appliquant notre formule, une puissance de rupture triphasée de 700 000 kilovolts-ampères. Dans un appareil de dimensions analogues que j'ai vu en Amérique, les constructeurs adoptaient le chiffre de 800 000 kilovolts-ampères. On arrive, dans l'application, à des chiffres sur lesquels, vous le constatez, les ingénieurs sont à peu près d'accord.

» Nous ne nous étendrons pas plus longuement sur la question des interrupteurs à huile, bien que ce soit un sujet très vaste et sur lequel il reste encore beaucoup à dire, et nous allons, si vous voulez bien, nous entretenir un peu des installations d'extérieur.

LES INSTALLATIONS D'EXTÉRIEUR.

» L'appareillage à haute tension a créé des préoccupations d'isolement très considérables. Les ingénieurs américains ont commencé à faire des interrupteurs pour l'intérieur ; mais les distances à adopter dans les installations sont telles, que les bâtiments prennent des proportions onéreuses et l'on s'est vite aperçu que les précautions à prendre pour protéger les appareils eux-mêmes contre les intempéries conduisent à des dépenses beaucoup moins grandes que les bâtiments.

» On a donc été conduit à étudier avec plus de précaution les interrupteurs pour emploi à l'extérieur, et après quelques tâtonnements, on est arrivé à une solution satisfaisante.

» A partir de ce moment a été admise l'idée des sous-stations extérieures, qui sont très en honneur en Amérique.

» Et vraiment, quand on visite ces installations, on se demande s'il est bien nécessaire de construire des bâtiments pour des installations supérieures à 75 000 volts, car le prix du bâtiment est souvent bien plus élevé que le prix de l'installation elle-même. Les Américains ont étendu très loin la conception des installations extérieures. Je crois qu'en France, il y aurait intérêt à examiner avec plus de soin et un plus grand désir d'économie ce genre d'installation.

» A partir de quelle tension a-t-on intérêt à les adopter ? A partir de 60 000 volts, la question ne se pose pas : faire des installations extérieures est très indiqué et nettement économique. Mais, je crois qu'en examinant le problème sous toutes ses faces, à partir de 45 000 volts, il y a intérêt à recourir aux installations extérieures.

» Les quelques vues suivantes montrent divers dispositifs ayant trait à ces installations.

» Ceci vous représente un sectionneur pour l'extérieur. Les isolateurs sont mis en enfilade (fig. 15 a).

» Voici (fig. 15 b) un sectionneur fort curieux, qui a été un sujet d'étonnement. Si nos constructeurs français proposaient de pareils modèles, il est probable qu'ils ne seraient pas acceptés par leurs clients.

» Vous voyez là (fig. 15 c) une installation de parafoudres. La conception est plus sérieuse et comporte des pylônes métalliques.

Constatez cependant que cette colonne, dont la solidité semble des plus précaires, surtout si l'on considère qu'elle est soumise à l'action du vent, est néanmoins très résistante.

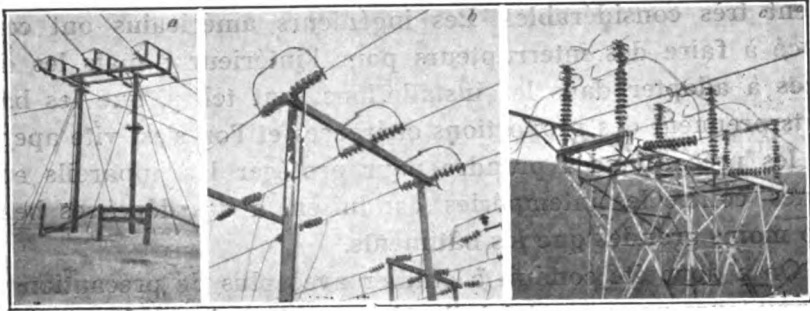


Fig. 15. — Vues de sectionneurs aériens.

» La vue suivante, qui vient de m'être envoyée, représente une sous-station américaine récemment mise en service, et que j'avais vue en construction (fig. 16 a).

» Voilà la même sous-station (fig. 16 b) vue de plus loin ; vous pouvez vous rendre compte de l'installation dans son ensemble.

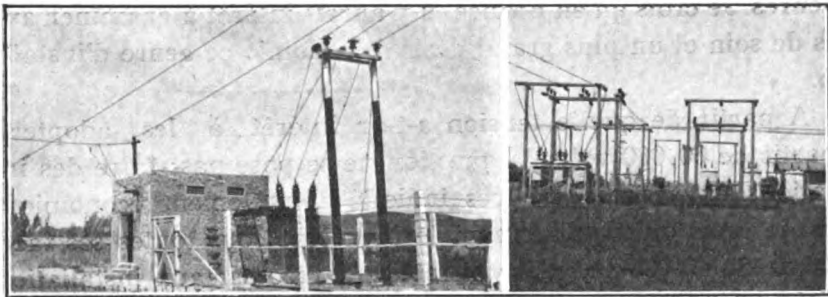


Fig. 16. — Sous-station américaine.

» Voilà une autre sous-station, faite également avec des poteaux en bois. Les transformateurs sont branchés simplement au passage des lignes (fig. 17 a).

» Voici encore une autre installation encore plus rudimentaire que les précédentes. Les transformateurs à huile sont d'un modèle réduit et placés en élévation (fig. 17 b).

» Voilà maintenant un transformateur de 4 000 kilowatts dans une sous-station extérieure.

» Cette vue et les précédentes montrent bien la simplicité de ces installations.

» Voici une vue d'une installation qui sera plus moderne (figure 17 c). Elle était en construction, il y a dix-huit mois, et n'est pas encore achevée, je crois. On y emploie des pylônes métalliques.

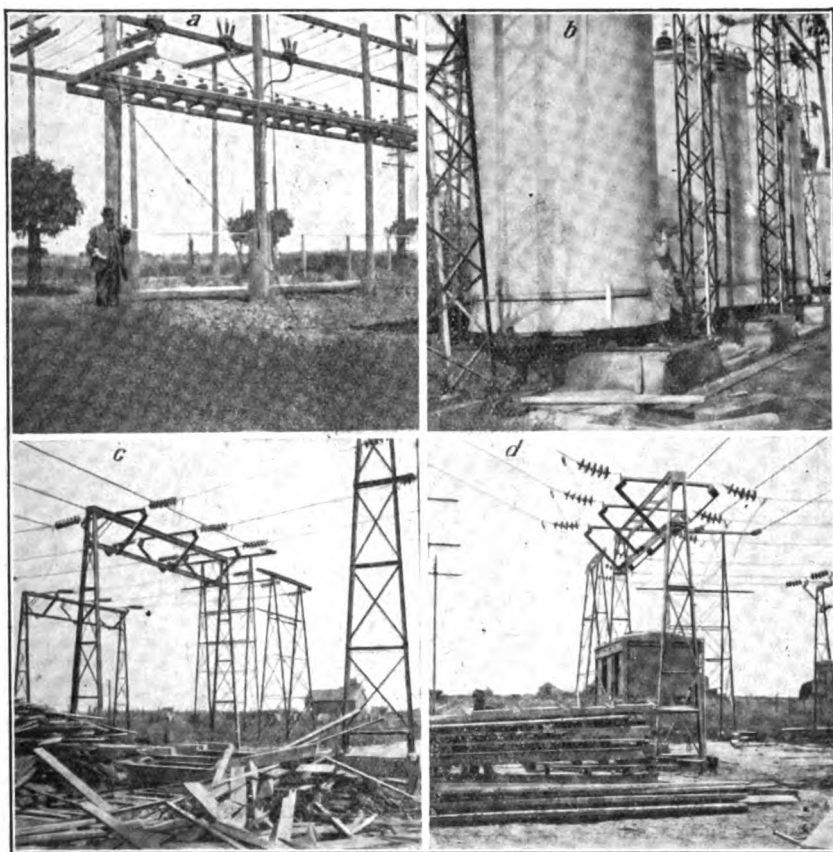


Fig. 17. — Différentes vues de sous-stations extérieures

» La figure 17 d est une autre vue de la même sous-station en construction. Je vous signale la particularité suivante : dans cette sous-station, qui sera assez puissante, il y a trois transformateurs de 7 000 kilowatts. Cette sous-station est en pleine campagne, et la question du refroidissement se pose. Elle a été résolue par une circulation d'eau par pompe et un réfrigérant.

» En visitant ces différentes installations, j'ai été amené à cette conclusion : c'est que, même pour les stations centrales, il y aurait le plus grand intérêt à examiner si l'on ne devrait pas porter à

l'extérieur toutes les parties à très haute tension, y compris les transformateurs (fig. 18). A titre d'exemple, le bâtiment d'une des

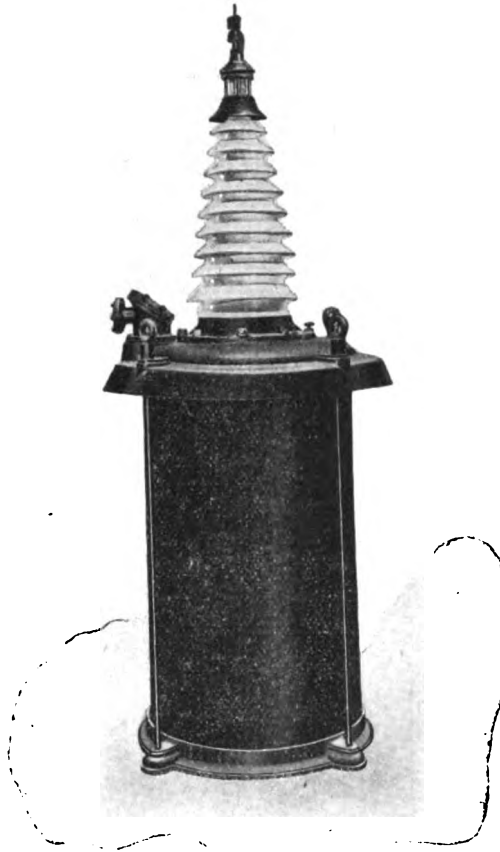


Fig. 18. — Vue d'un transformateur waterproof

centrales de Big Creek a coûté un million de dollars et son édification a duré une année.

» Dans cette centrale, les alternateurs triphasés de 20 000 kilovolts-ampères de chaque groupe sont actionnés par deux turbines hydrauliques en bout d'arbre, le tout forme un ensemble qui occupe 60 à 70 mètres carrés. Quatre de ces groupes tiennent facilement dans un espace couvert de 400 à 500 mètres carrés. Les alternateurs donnent 15 000 volts et débitent individuellement sur les transformateurs 15 000/150 000 volts.

» Cette centrale est reliée à ses voisines par deux lignes d'arrivée et deux lignes de départ; pour mettre tout ce matériel à

couvert, il a fallu un bâtiment énorme qui a coûté fort cher. Il y a une économie considérable à réaliser dans les futures installations, en France, en mettant tout l'appareillage, y compris les transformateurs, à l'extérieur.

» Je crois qu'il faudrait examiner cette question avec beaucoup de soin dans notre pays, et je ne saurais trop attirer votre attention sur ce point.

» J'en ai fini avec ce que je voulais vous dire concernant l'appareillage à très haute tension. Je vais maintenant envisager avec vous un autre grand problème de l'appareillage électrique qui intéresse tous les exploitants au plus haut point : la sélection.

LA SÉLECTION.

» Le problème de la sélection est le suivant : à l'heure actuelle, dans une installation tant soit peu importante, quand un court-circuit se produit quelque part, il est rare qu'un disjoncteur local seul soit intéressé, et les répercussions sont fort gênantes. Vous savez tous, certains d'entre nous malheureusement par expérience, les inconvénients qui en résultent ; souvent la centrale s'arrête, des entreprises de premier ordre sont immobilisées ; ainsi tout dernièrement, un court-circuit dans l'un des fours électriques de nos usines d'Ivry a provoqué l'arrêt de la centrale qui nous alimente et un arrêt momentané des tramways et du Métropolitain.

» Il est certain que, si l'on peut arriver à obtenir dans un réseau que les court-circuits soient rigoureusement et scientifiquement localisés, on aura réalisé un progrès, et c'est à ce programme que nous nous sommes attaqués. Déjà certaines solutions partielles existent, elles ne sont pas suffisantes encore.

» Deux ordres de précaution, pour localiser le défaut, sont à prendre. Tout d'abord, des mesures constructives dont le but est de limiter, autant que faire se peut, l'importance du court-circuit, en agissant sur la réactance des organes en service, alternateurs et transformateurs, et en utilisant au besoin des bobines spéciales pour créer cette réactance. La force électromotrice de self-induction croissant comme le carré de l'intensité, ces bobines peuvent n'être pas gênantes à la charge normale, si elles sont convenablement calculées.

» La deuxième précaution à prendre consiste dans l'emploi de

dispositifs assurant la sélection des déclenchements. Ce problème est ardu et c'est lui que je vais essayer de vous exposer.

» Le schéma (fig. 19) représente un réseau complet bouclé. Nous avons deux centrales : une centrale C qui, par deux feeders, alimente deux nœuds du réseau E et D et une autre centrale C', qui alimente un autre point par deux câbles en parallèle.

» Nous admettons que, dans la centrale C, par exemple, l'énergie part toujours dans le même sens, c'est-à-dire que la centrale C est toujours productrice, mais qu'au contraire, la centrale C' peut être productrice ou réceptrice.

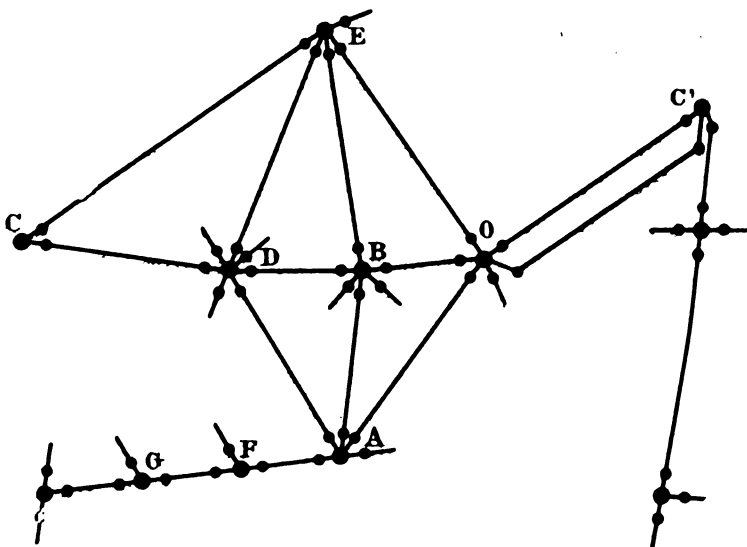


Fig. 19. — Schéma d'un réseau bouclé.

» Le feeder AG porte des points sur lesquels sont faits différents branchements,

» Je ne parlerai pas de la protection dans la centrale même, car ainsi que je vous le disais tout à l'heure, il y a certaines précautions et certaines dispositions à prendre, qui sont du domaine du constructeur de machines plutôt que de l'appareilleur; du reste, la tendance générale est de faire des machines qui puissent « tenir le coup ».

» Aussitôt qu'on s'éloigne sur le feeder, les court-circuits sont loin d'atteindre la valeur de ceux de la centrale. Je m'occuperai donc uniquement des disjoncteurs de feeder et j'examinerai les différents cas qui peuvent se présenter.

» Avant de le traiter, il est nécessaire de décrire deux appareils fondamentaux : un transformateur d'intensité spécial et un relais à cataracte à mercure.

» En ce qui concerne le transformateur d'intensité spécial, chacun sait que les disjoncteurs (puisque en somme il s'agit de faire fonctionner les disjoncteurs au moment opportun) sont alimentés par des transformateurs d'intensité. Ces derniers agissent sur des relais. Il existe dans le commerce des relais qui sont temporisés ou retardés et font fonctionner les disjoncteurs plus ou moins vite, mais tous ces relais ont une courbe de temporisation qui coupe l'axe des intensités sous un angle relativement voisin de la normale au lieu de tendre vers une asymptote à cet axe.

» C'est ainsi, par exemple, qu'un relais fonctionnera instantanément si l'intensité est égale à trois fois la normale. Or, cette marge est tout à fait insuffisante dans les réseaux importants pour obtenir la sélection, car il peut arriver que, dans un réseau comme celui dont je vous donnais le schéma tout à l'heure, un court-circuit se produisant en un point entraîne à des surintensités atteignant jusqu'à vingt fois l'intensité normale, si bien qu'au lieu de faire fonctionner seulement le disjoncteur voisin, cette surintensité fera déclencher tous les disjoncteurs placés en série.

» Qu'a-t-on fait ? On a imaginé différents dispositifs très ingénieux dont l'un consiste à avoir un relais qui, jusqu'à une certaine intensité, double ou triple de la normale par exemple, fonctionne dans les conditions que je viens de vous indiquer, mais qui, à partir de cette intensité, met un temps fixe, 5 secondes par exemple, pour fonctionner. C'est la combinaison d'un relais à temps avec un relais temporisé, d'un relais de courant avec un relais d'horlogerie. Quelle que soit la valeur du court-circuit, on est conduit, pour avoir une sélection dans ce principe, à faire supporter aux installations un court-circuit pendant un minimum de 5 secondes, et même beaucoup plus s'il y a des disjoncteurs en cascade. Ce sont des temps beaucoup trop prolongés, qui permettent aux câbles de brûler et aux installations de se détruire.

» Le problème est le suivant : Obtenir la sélection des déclenchements, mais en posant comme principe, que toujours, pour une valeur un peu inférieure ou au plus égale à celle du court-circuit, le fonctionnement soit instantané et que, pour toutes les valeurs inférieures à cette limite, ce soit le disjoncteur local qui déclenche et celui-là seulement.

» Par conséquent, on peut admettre que, dans ces conditions, les installations seront protégées. C'est pour la solution de ce problème que nous avons réalisé le transformateur d'intensité spécial dont il s'agit, qui est appelé transformateur d'intensité sélectif à fuite magnétique (fig. 20).

» La figure représente un cadre magnétique, un enroulement

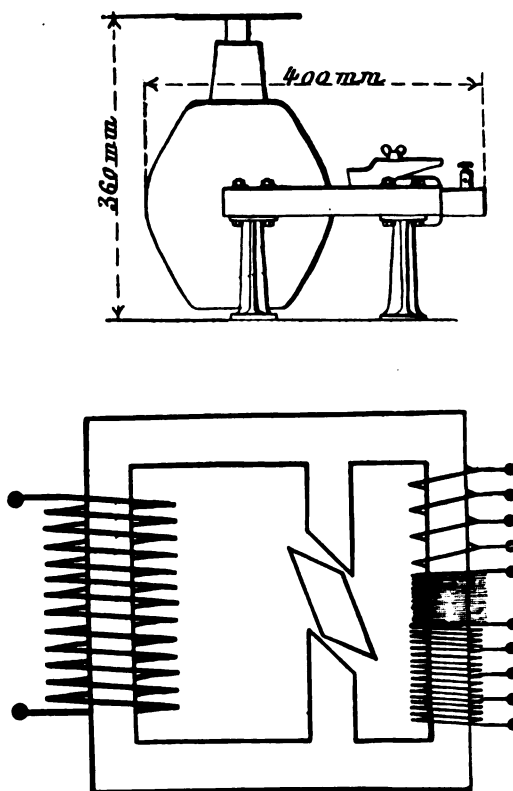


Fig. 20. — Transformateur d'intensité sélectif à fuite magnétique.

primaire et un enroulement secondaire. Entre les deux enroulements, nous avons une fuite magnétique, qu'il est possible de régler. Avec un tel appareil, le rapport entre l'intensité inductrice et l'intensité induite n'est plus constant, mais varie pour chaque valeur d'intensité. Pour simplifier les explications, je supposerai un transformateur dont le rapport serait considéré fictivement comme étant 10/10. En réalité, ce transformateur comporte au secondaire 75 spires et au primaire 260 spires. Nous l'avons appelé 10/10 parce que l'intensité induite est d'environ 10 ampères

quand l'intensité inductrice est de 10 ampères seulement, mais par sa constitution même ses rapports sont différents au-dessus et au-dessous de ce point.

» Dans un transformateur ordinaire, la courbe du rapport des intensités inductrices aux intensités induites est dans toute l'échelle une ligne droite. Dans le transformateur sélectif, au contraire, ce n'est pas une ligne droite. La courbe prend la forme représentée sur le graphique. Si nous portons en abscisses les intensités inductrices et en ordonnées, les intensités induites, nous obtenons une courbe qui, à l'origine, serait tangente à la ligne droite représentant le rapport exact du nombre de spires (fig. 21).

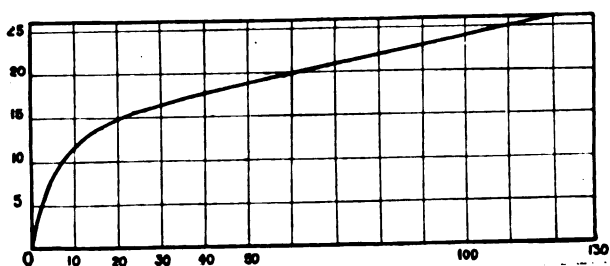


Fig. 21. — Courbes des intensités secondaires en fonction des intensités primaires.

» Cette courbe s'infléchit, si bien, qu'alors qu'au début, pour une intensité inductrice de 10 ampères, l'intensité induite était de 12 ampères, nous voyons que, pour une intensité inductrice de 110 ampères, nous avons une intensité induite qui n'est que de 25 ampères.

» On conçoit que, si nous donnons, et c'est ce qui est réalisé dans l'appareil considéré, une section suffisamment faible au circuit magnétique, il se trouve que, pour une certaine valeur de l'intensité inductrice, nous ayons une saturation du fer, et alors point très intéressant, à partir d'un moment donné, quelle que soit l'intensité inductrice, l'intensité induite ne monte plus.

» Nous appellerons transformateur au rapport N un transformateur dans lequel le secondaire restant ce qu'il est, le primaire comporterait N fois moins de spires, la section du cuivre étant augmentée dans la même proportion, de façon à ce que le nombre d'ampères-tours primaires puisse être atteint.

» C'est ainsi que, dans le tableau ci-dessous, nous donnons le

nombre de spires correspondant à différents rapports fictifs de transformation :

	1	2	3	5	10	15	25 etc...
» Nombre de spires							
primaires	260	130	87	52	26	17	12
» Nombre de spires							
secondaires	75	75	75	75	75	75	75

» Bien entendu, ces chiffres valent pour les dimensions constructives de l'exemple donné et seraient tout différents pour une autre construction.

» En utilisant les particularités qui précèdent, nous avons créé un transformateur dont les dimensions d'un type pour emploi jusqu'à 15 000 volts sont données figure 20.

» Le circuit inducteur est noyé dans une masse isolante très compacte, de façon à s'opposer aux effets dynamiques très violents qui se produisent au moment d'un court-circuit. Le circuit secondaire est placé à l'extérieur, de façon à permettre un réglage commode.

» Nous avons prévu sur le circuit secondaire des dérivations d'une spire, au début, et de 5 spires à la fin, si bien qu'avec un circuit secondaire de 75 spires, nous pouvons régler de spire en spire entre 75 et 50.

» On peut régler une fuite magnétique au moyen de différents repères. Sur l'appareil, on mettra un repère 1, un repère 2, un repère 3, etc., ce qui voudra dire que la fuite est plus ou moins grande suivant que le repère est plus ou moins éloigné.

» Si nous nous servons de ce transformateur d'intensité avec un relais déterminé, le retard va varier suivant la position de la fuite dans le transformateur.

» Le transformateur sélectif étant décrit, passons au relais à cataracte à mercure. Il est nécessaire que ce relais soit retardé et analogue comme but à ceux qui existent dans le commerce.

» Ces relais présentent à la fois des avantages et des inconvénients; certains fonctionnent d'une façon à peu près régulière, ce sont ceux qui sont basés sur une action magnétique. D'autres fonctionnent beaucoup plus difficilement.

» Pour avoir un appareil rigoureusement précis (fig. 22), nous avons imaginé un dispositif qui n'est pas le même que ceux qui sont employés généralement. Il donne une solution aussi complète que possible. Nous prenons un récipient dans lequel

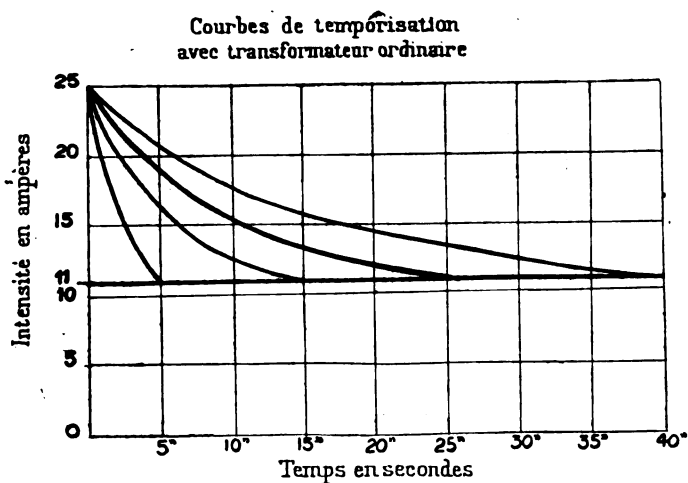
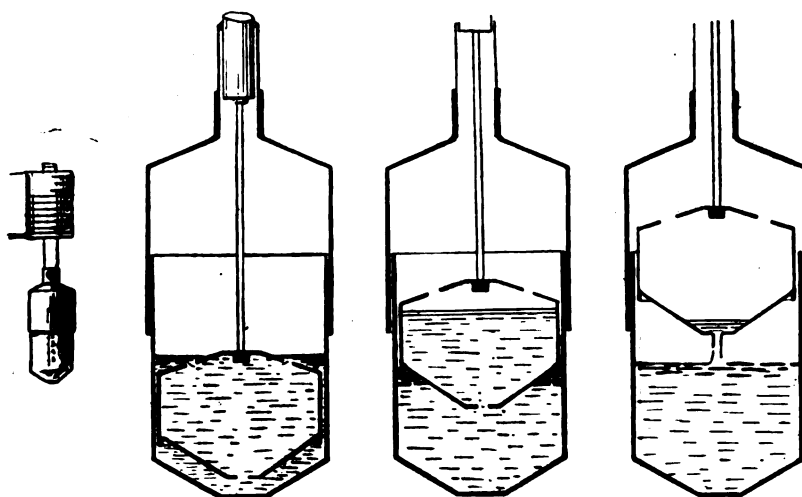


Fig. 22. — Relais retardé.

se trouve du mercure. Dans ce récipient, plonge une coupelle qui est percée d'un trou à la partie inférieure. Si l'on sollicite cette coupelle au moyen d'un solénoïde, les ampères-tours ont tendance à soulever le mercure; s'ils ont une énergie suffisante, l'attraction

se produit et le déclenchement a lieu. Si le nombre d'ampères-tours n'est pas suffisant, que se passe-t-il ? La petite coupelle ne peut pas être soulevée, mais elle est néanmoins soulagée par une force qui oblige le mercure à s'écouler par l'orifice inférieur; elle s'allège petit à petit, et quand il ne reste plus une quantité suffisante de mercure pour équilibrer l'action attractive du solénoïde, le noyau part et le déclenchement a lieu.

» De sorte qu'en réglant la hauteur du mercure dans le récipient, on arrive à régler l'intensité à laquelle le déclenchement aura lieu instantanément. D'autre part, il suffit de régler la dimension du trou ménagé au fond de la coupelle, pour régler la temporisation, et l'on se trouve avoir un ensemble qui obéit à deux lois bien déterminées: celle d'attraction du solénoïde, d'une

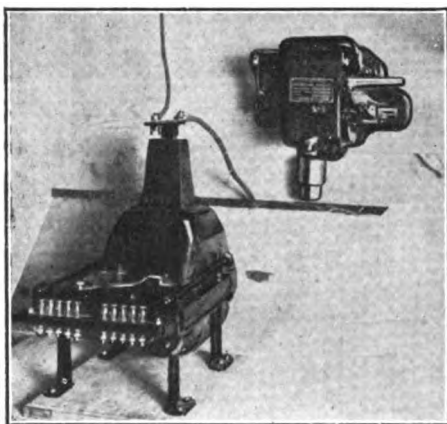


Fig. 23. — Transformateur sélectif.

part, et celle d'écoulement du mercure par un orifice en minces parois, d'autre part. Voici des exemples des courbes de fonctionnement de cet appareil: nous avons porté en abscisses, les temps; en ordonnées, les intensités; toutes ces courbes ont une même valeur de déclenchement instantané qui est 25 ampères et peuvent donner, pour les déclenchements retardés, des temps qui vont de 5 à 40 secondes.

» Cet appareil est caractéristique, en ce sens qu'il n'y a pas d'autre frottement que celui du mercure à travers un petit orifice. Les lois de l'écoulement du mercure sont constantes, et la particularité de cet appareil extrêmement simple est, qu'une fois réglé, la précision est rigoureuse.

» Voici une photographie d'un transformateur sélectif (fig. 23) :

» Si maintenant on alimente un relais à cataracte tel que celui décrit plus haut par un transformateur sélectif et que l'on trace une courbe du temps de déclenchement en fonction de l'intensité inductrice, on obtient une courbe nouvelle. Dans la courbe ci-dessous, on a tracé les différents retards introduits dans le fonctionnement du relais pour des intensités déterminées en fonction des différentes positions de fuite (fig. 24).

» Examinons maintenant les différents problèmes qui se présentent dans la pratique et auxquels ces appareils peuvent être appliqués.

» Le premier problème est celui du poste de dérivation. Un transformateur est branché sur un câble. Il est de pratique cou-

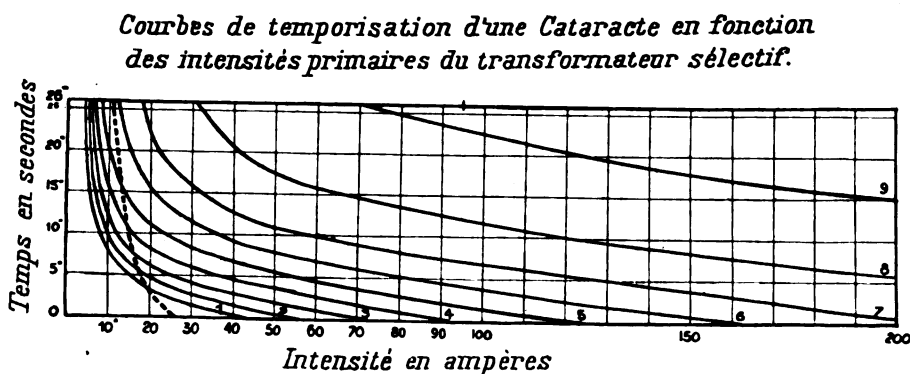


Fig. 24. — Courbes de temporisation d'une cataracte.

rante que le fonctionnement de ce transformateur entraîne, en cas de surcharge, le fonctionnement du disjoncteur. La première préoccupation est donc d'organiser le poste classique, le poste d'abonné, de façon que les accidents qui se produisent chez lui n'aient pas de répercussion dans le réseau et de faire que la liaison électrique soit convenablement établie.

» A l'heure actuelle, prenons un abonné de 100 kilowatts. On installe un disjoncteur et une bobine sur la haute tension pour 100 kilowatts. On commet une erreur, parce qu'on est conduit, en procédant de cette manière, à provoquer, quand se produit un court-circuit sur la haute tension de l'abonné, un appel de courant considérable dont la valeur est déterminée par le réglage même du disjoncteur du secteur. En effet, en intercalant dans le circuit une bobine à fil fin, cinq fois sur dix, si le court-circuit sur

la haute tension est très violent, on a, aux bornes de la bobine du disjoncteur, un amorçage d'arc.

» L'amorçage vient de ce fait qu'on a intercalé sur le circuit une impédance considérable, telle que la force électromotrice de self-induction aux bornes de la bobine est suffisante pour amorcer un arc entre ces bornes.

» La solution consiste à mettre sur la haute tension une bobine de disjonction en rapport avec l'importance du court-circuit de ligne, importance qui n'a généralement aucun rapport avec la puissance du transformateur de l'abonné.

» Il faut, au contraire, se préoccuper, pour le côté basse tension, de la puissance que doit fournir le transformateur de l'abonné. Si on a par exemple une puissance de 200 kilovolts-ampères, on

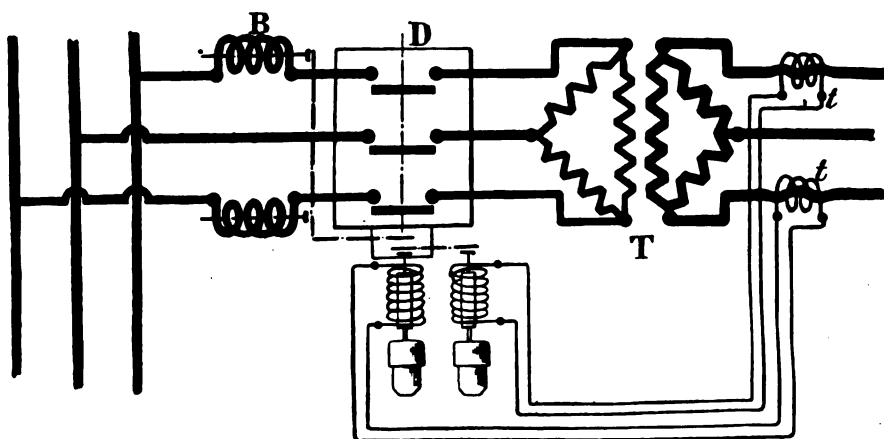


Fig. 25. — Disposition des relais à cataracte.

mettra sur la basse tension une bobine qui sera réglée pour 250 kilovolts-ampères.

» La solution consiste alors à avoir un disjoncteur unique placé sur la haute tension, actionné à la fois d'une façon temporisée par la cataracte décrite plus haut, et par un enroulement placé sur la haute tension, soit transformateur d'intensité, soit bobine directe et actionné en même temps par des transformateurs d'intensité placés sur la basse tension (fig. 25).

» Dans ces conditions, et quelque court-circuit qui se produise chez l'abonné, le disjoncteur, instantanément fonctionnera, et le court-circuit qui se produira sur la haute tension n'aura pas chance d'amorcer l'arc aux bornes de l'interrupteur.

» **Signalons en passant** que, chez l'abonné même, le principe de la sélection est possible et, par son application, rendrait les plus grands services pour empêcher, par exemple, qu'un court-circuit dans un atelier entraîne l'arrêt de toute une usine.

» Les deux interrupteurs (fig. 26) ont été construits suivant la conception exposée précédemment.

» Nous allons traiter maintenant le cas des disjoncteurs en cascade.

» Pour faciliter le choix des transformateurs sélectifs qui nous sont nécessaires, nous donnons ci-dessous des courbes dans lesquelles les intensités induites sont exprimées en fonction des in-

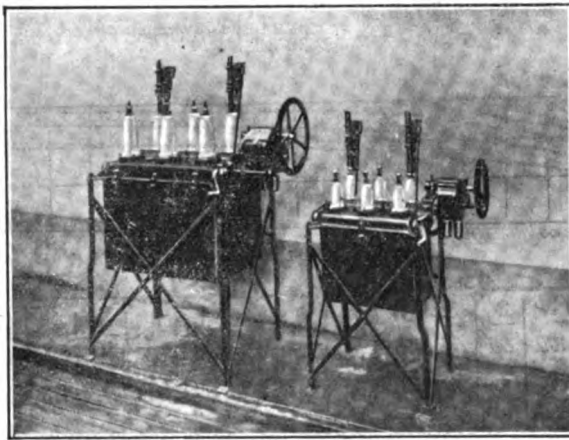


Fig. 26. — Interrupteurs à sélection.

tensités inductrices pour différentes valeurs de la fuite (fig. 27).

» Considérons un feeder qui part d'une station A, soit sous-station, soit station centrale. Il a une certaine longueur et arrive à un poste muni de trois disjoncteurs, ceux d'entrée, de sortie et de dérivation. Un autre poste est placé plus loin en enfilade. A l'extrémité du câble se trouve un point d'utilisation. Un court-circuit survenant en un point quelconque du câble doit faire fonctionner le disjoncteur placé immédiatement avant et celui-là seul; de plus, en cas de court-circuit franc, le disjoncteur intéressé doit fonctionner instantanément. Ce problème nous a été posé avec des chiffres concrets et a été traité, nous allons voir comment, avec le transformateur sélectif et le relais à cataracte.

» La première des choses est de connaître dans une installation

les intensités de courts-circuits. Les exploitants s'en préoccupent rarement.

» Pour déterminer cette intensité, on peut faire soit des mesu-

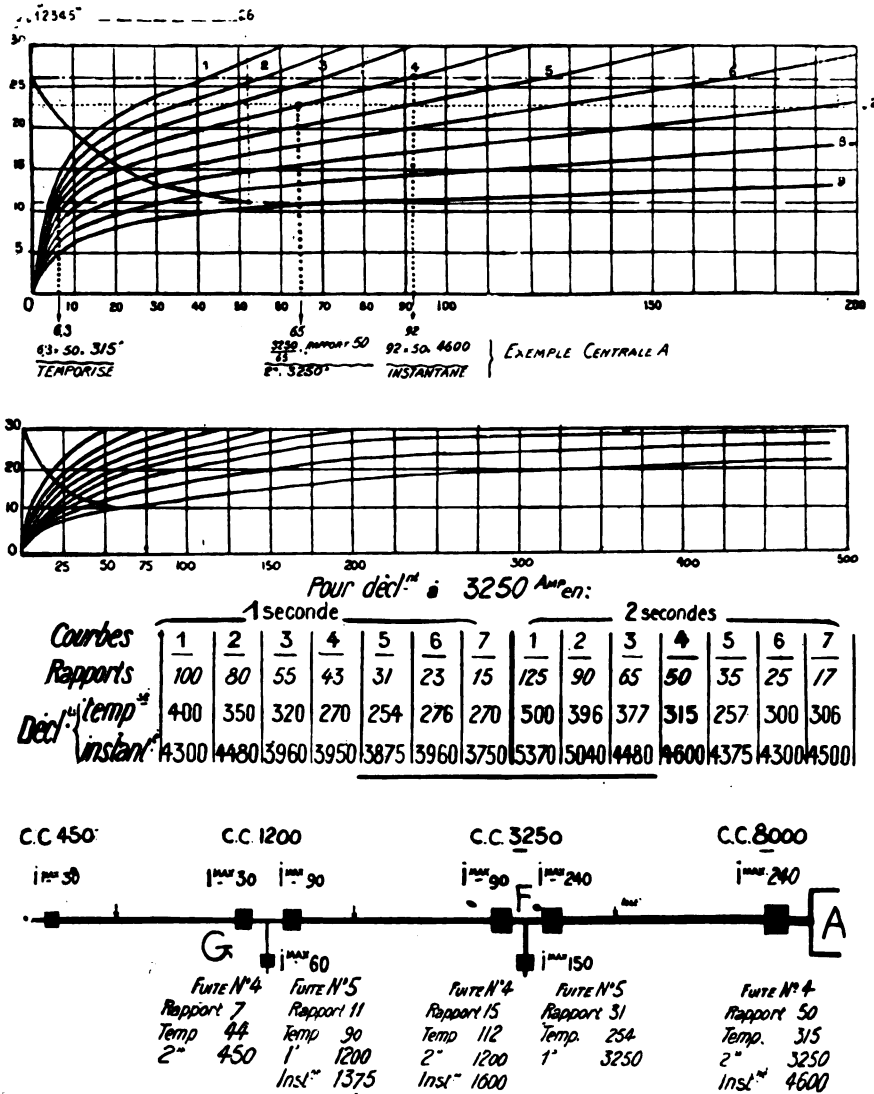


Fig. 27. — Courbes pour l'étude des transformateurs sélectifs.

res, soit des calculs. Le problème n'offre quelques complications que dans les circuits bouclés.

» Dans le cas concret qui nous était soumis, les intensités de courts-circuits étaient de 8 000 ampères au poste A, 3 250 au poste F, 1 200 au poste G et 450 en bout de ligne.

» Si l'on étudie les courbes précédentes, on voit, pour le premier poste, en mettant le relais sélectif au repère 4, ce qui, on s'en souvient, correspond à une position déterminée de la fuite magnétique en prenant un rapport fictif, 50, le déclenchement temporisé aura lieu à partir de 315 ampères, puisque 315 ampères rapportés à notre transformateur type 10/10 correspondent à 6,3 ampères, et que cette valeur dans le circuit inducteur donne avec la fuite n° 4 une intensité de 11 ampères dans le circuit induit correspondant à la valeur minimum de déclenchement avec un retard de 25 secondes. Cherchons quel sera le retard pour 3 250 ampères correspondant au court-circuit dans le poste suivant, F. Un raisonnement analogue va nous permettre de le déterminer: 3 250 ampères ramenés au transformateur type correspondent à 65 ampères d'intensité inductrice, soit 22,5 ampères d'intensité induite, donnant un retard de 2 secondes ; ainsi donc, pour tout court-circuit se produisant au poste F, le poste A mettra au moins 2 secondes avant de fonctionner; il suffira donc que le disjoncteur du poste F fonctionne instantanément pour cette valeur, pour que la sélection soit assurée.

» Voyons maintenant si nous sommes protégés contre un court-circuit au poste A. La valeur de ce court-circuit étant de 8 000 ampères, il faut et il suffit que nous déclenchions instantanément pour une valeur inférieure ou au plus égale à 8 000 ampères.

» Pour déclencher instantanément, il faut 25 ampères dans le circuit induit correspondant avec la fuite 4 à 92 ampères inducteurs, ce qui représente 4 600 ampères avec le rapport 50 que nous avons adopté; nous avons donc toute sécurité de ce côté.

» Examinons maintenant ce qui se passe au poste F; le premier disjoncteur doit pouvoir déclencher instantanément ou avec une valeur moindre que 2 secondes pour 3 250 ampères, et fonctionner avec un retard de 25 secondes aux environs de 240 ampères, prenons la fuite 5 et un transformateur ayant un rapport de 31 ; pour le fonctionnement retardé, il faut une intensité inductrice ramenée au transformateur type de 8,2 ampères, soit avec le rapport de 31 choisi, une intensité de 254 ampères, ce qui correspond aux données du problème.

» L'intensité de court-circuit de 3 250 ampères, ramenée au transformateur type, correspond à une valeur de 105 ampères, soit une temporisation de 1 seconde; il nous reste donc une marge de 1 seconde par rapport au disjoncteur du poste A, cette marge

est suffisante; mais il faut également que, si le court-circuit se produit après le deuxième disjoncteur, au lieu de se produire entre les deux, ce soit celui-ci qui déclenche pour ne pas apporter de perturbation sur le feeder pris en dérivation.

» Ce disjoncteur doit commencer à déclencher aux environs de 90 ampères et avoir un retard de 2 secondes pour l'intensité de 1 200 ampères du poste suivant (poste G), être instantané pour l'intensité de court-circuit de 3 250 ampères, de façon à présenter une sélection de 1 seconde par rapport au disjoncteur d'amont.

» Prenons la fuite N° 4 et un rapport de 18, nous aurons fonctionnement instantané à $6,3 \times 18 = 113$ ampères. Pour 1 200 ampères correspondant à une intensité ramenée au transformateur type de 66 ampères, soit une intensité induite de 23 ampères, le retard sera sensiblement de 2 secondes et le fonctionnement sera instantané pour $92 \times 18 = 1\,656$ ampères.

» Les conditions du problème sont donc également réalisées pour ce poste, et en continuant ainsi de proche en proche, elles se trouveraient vérifiées pour tous les postes; les chiffres sont du reste portés sur les graphiques.

» On voit donc, par l'exemple que nous venons de traiter, et qui correspond à un cas très délicat, pris dans la pratique, que nous pouvons toujours trouver, dans de certaines limites, des solutions qui satisfassent à tous les problèmes.

» Qu'entendons-nous par « certaines limites » ? Ceci : Je vous montre que, dans l'appareil du poste A, le déclenchement temporisé est de 315 ampères. Il se trouve que l'intensité normale prévue est de 240 ampères. Il y a une marge, en effet. Mais il ne serait peut-être pas possible de trouver un disjoncteur qui fonctionne normalement à 10 ampères, et dont l'intensité de court-circuit soit 8 000 ampères, par exemple. Dans la pratique, cela ne se produit pas. Il y a toujours un rapport, si grand soit-il, entre l'intensité normale et l'intensité de court-circuit. On peut toujours, dans le rapport de 1 à 20, trouver la courbe nécessaire entre l'intensité de déclenchement normale et l'intensité de déclenchement de court-circuit. Il pourrait y avoir un courant normal de 20 ampères et un courant de court-circuit de 400 ampères. Dans la pratique, les marges sont toujours comprises entre ces deux limites ; par conséquent, la solution est facile.

» Nous allons maintenant examiner le cas de 2 feeders en parallèle, dans lesquels l'énergie vient toujours dans le même sens ;

ce serait le cas des deux câbles partant de la centrale C' (voir fig. 19); dans ce cas, le problème est simple, il a été résolu par nous et breveté en 1912. Il est appliqué dans de nombreux cas, et notamment dans les sous-stations de la Compagnie parisienne de Distribution d'Electricité. Ce système consiste à mettre à l'arrivée un relais wattmétrique agissant instantanément sur les disjoncteurs de chaque feeder quand il y a un retour de courant. Au départ de chaque feeder, il y a, au contraire, un disjoncteur temporisé.

» Le fonctionnement est le suivant :

» Quand, dans un câble de cette nature, se produit un court-circuit, le relais à retour fonctionne instantanément, le court-circuit se trouve alimenté seulement par le disjoncteur de départ qui fonctionne sans répercussion sur les autres. Une seule cause de non fonctionnement subsistait jusqu'à présent ; elle résidait dans la réalisation même des relais wattmétriques du commerce construits sur des principes de compteurs, lesquels ne procuraient qu'une énergie cynétique très faible, et nécessitaient par conséquent une tension assez élevée et une source auxiliaire pour fonctionner. Nous avons réalisé pour ce but spécial un relais wattmétrique tel qu'il agisse directement sur le mécanisme du disjoncteur, sans source auxiliaire, et ne nécessite pour sa polarisation qu'une tension minime. Ce dernier point a son importance en cas de court-circuits violents; il y a généralement dans les sous-stations une baisse de tension suffisante pour rendre précaire l'indication des bobines wattmétriques.

» Nous venons de donner la solution pour les lignes de dérivation, les feeders de départ et les câbles en parallèle avec un sens unique de l'énergie; il nous reste à examiner un cas plus complexe ; c'est celui des feeders dans les réseaux bouclés, nécessitant le passage de l'énergie dans les câbles tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre; ce serait, en particulier, le cas des câbles de la centrale C (voir fig. 19).

» Il existe deux solutions du problème : l'une, qui consiste à mettre un transformateur d'intensité à chaque extrémité du câble et de les brancher en opposition au moyen d'un fil pilote. Si l'énergie passe dans le câble dans un sens, les deux transformateurs d'intensité s'annulent. Il n'y a pas de déclenchement. Si un court-circuit se produit au milieu d'un câble, c'est qu'il y a accident ;

dans ce cas, il y a inversion d'un des transformateurs et passage d'un courant qui fait fonctionner les disjoncteurs.

» On peut employer également un fil pilote et des relais wattmétriques, mais les systèmes sont coûteux et peuvent donner lieu à caution. Le fil peut se couper et, d'ailleurs, il n'existe pas dans toutes les installations ; dans ce cas, il faudrait l'installer spécialement.

» Nous avons donc cherché à remplacer ce fil, et nous croyons avoir trouvé une solution satisfaisante de ce problème : un feeder réunit deux stations et doit être traversé par l'énergie, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. On peut prendre les transformateurs sélectifs dans le genre de ceux dont j'ai parlé. Mais, si, avec un court-circuit ou un défaut plus léger dans un des câbles, il y a afflux d'énergie des deux côtés, dans ce cas-là, on doit faire déclencher instantanément les deux appareils, même si l'intensité sur l'un d'eux n'est pas considérable, de façon à ne pas continuer à alimenter le défaut.

» Nous avons alors songé à la solution suivante, qu'il est possible d'appliquer avec les éléments qu'on trouve dans le commerce. Elle consiste à envoyer dans le câble lui-même des courants de fréquences différentes agissant sur un relais spécial (figure 28).

» Vous voyez ici un disjoncteur. Ce disjoncteur est susceptible d'être déclenché par deux électro-aimants accordés à deux fréquences différentes, c'est-à-dire par des électro-aimants qui fermeront un contact dans le cas seulement où on les alimentera par un courant de fréquence déterminée. On accorde, par un système quelconque, pourvu qu'il produise la résonance voulue, une self-induction et un condensateur, par exemple, ou mieux encore, un petit alternateur spécialement disposé à cet effet. Ces appareils existent dans le commerce ; en pratique, il peut suffire de commander le disjoncteur par deux petits électro-aimants accordés et branchés, d'un côté sur un transformateur de potentiel, et, de l'autre, par l'intermédiaire de condensateurs, sur les fils de ligne. A chacun des postes se trouve un relais wattmétrique. C'est ce relais que j'avais proposé dans ma solution, avec fil pilote, il y a douze ans.

» Supposons le poste S et le poste S' réunis par un câble triphasé et l'énergie passant normalement de S en S'. Un relais, celui du poste générateur S, va se fermer. Celui du poste S' reste ou-

vert, et il y a émission par exemple par le poste S de courant à la fréquence 2 000 p.s.

» Supposons que l'afflux d'énergie change de sens, tout en restant normal. Le poste S n'envoie plus rien, et le poste S' devenu générateur envoie du courant à la fréquence de 3 000 p.s. Ni l'un, ni l'autre des disjoncteurs n'a fonctionné.

» Supposons alors qu'un court-circuit se produise au milieu du câble. Le sens du courant change alors dans le poste

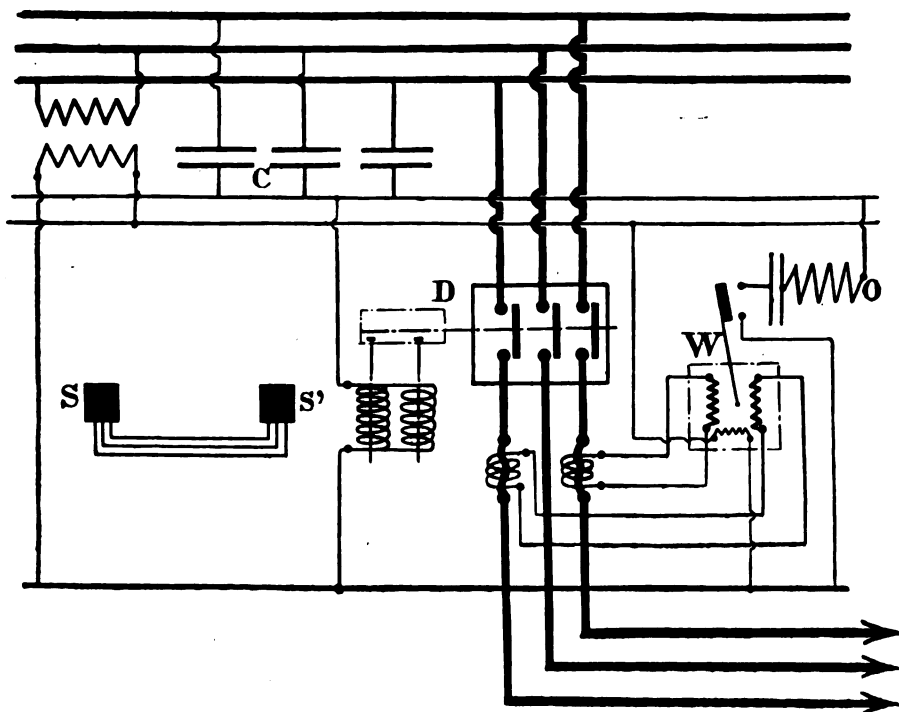


Fig. 28. — Schéma.

récepteur et les deux relais wattmétriques fonctionnent en même temps. A ce moment-là et instantanément, les deux électro-aimants sont attirés et font fonctionner les disjoncteurs. Le principe est donc simple et ne présente aucune difficulté d'application, car tous les appareils nécessaires se trouvent maintenant dans le commerce et donnent de bons résultats. Nous avons donc, de ce côté, tous les moyens de résoudre le problème.

» C'est tout ce que je vous dirai sur les principes de la sélection, puisque, en somme, tous les problèmes se trouvent résolus.

» Je voudrais maintenant vous entretenir pendant quelques instants des sous-stations automatiques.

LES SOUS-STATIONS AUTOMATES.

» Tout d'abord, permettez-moi de vous proposer un vocable : on parle de sous-stations « automatiques » ; on parle d'appareils « automatiques ». Je crois qu'il serait préférable de dire « *automate* », pour qu'on s'entende bien. De même un appareil automate sera autre chose qu'un appareil automatique. Un appareil automate sera celui qui se ferme tout seul, qui s'ouvre si l'énergie n'est pas suffisante, qui se referme, si le court-circuit est disparu. Ainsi, nous appellerons appareils et sous-stations automates, ceux dans lesquels les mouvements s'accompliront d'eux-mêmes : le vocable automatique, nous le garderons pour ceux qui l'ont déjà reçu.

» En Amérique, et je crois que les industriels français auraient grand intérêt à étudier ces questions et surtout à adopter les solutions qui l'ont été là-bas, en Amérique, dis-je, on a supprimé dans de nombreux cas la manœuvre humaine. Il y a une foule de sous-stations, où la puissance atteint 1 000 et 2 000 kilowatts, dans lesquelles on ne voit plus personne. Je vous citerai le cas de cinq stations qui alimentent les tramways de Los Angeles. Il y a, en tout et pour tout, un seul homme, et la puissance de ces sous-stations varie entre 550 et 2 000 kilowatts.

» Les Américains sont en train de tout transformer chez eux.

» Ce qu'il y a de remarquable, c'est que l'exploitant dit : « Ce n'est pas tant pour l'économie que cela nous procure que pour la sécurité que nous en avons. » On a reconnu que l'automatisme était une chose assez difficile à obtenir ; mais une fois qu'elle est bien réalisée, elle donne une plus grande sécurité que les installations ordinaires.

» Il est difficile, pour ne pas dire impossible, actuellement, de trouver une solution type et un appareil unifié qui solutionne tous les cas de sous-stations automates et c'est généralement un ensemble, une combinaison de différents appareils judicieusement choisis, qui permet de réaliser le processus des manœuvres, dans l'ordre et au moment voulu.

» Nous sommes néanmoins arrivés à une très réelle simplification dans cet ordre d'idées, et nous avons réduit au minimum le nombre et la diversité des appareils à commander.

» Nous avons notamment créé un mécanisme très simple, dit mécanisme automate, que nous employons, d'une façon presque exclusive, pour exécuter toutes les manœuvres un peu complexes,

telles par exemple que la refermeture automatique d'un foeder, après disjonction à des intervalles de temps déterminés et réglables, et ouverture définitive au bout d'un certain nombre de fonctionnements infructueux, mise en marche ou arrêt automati-

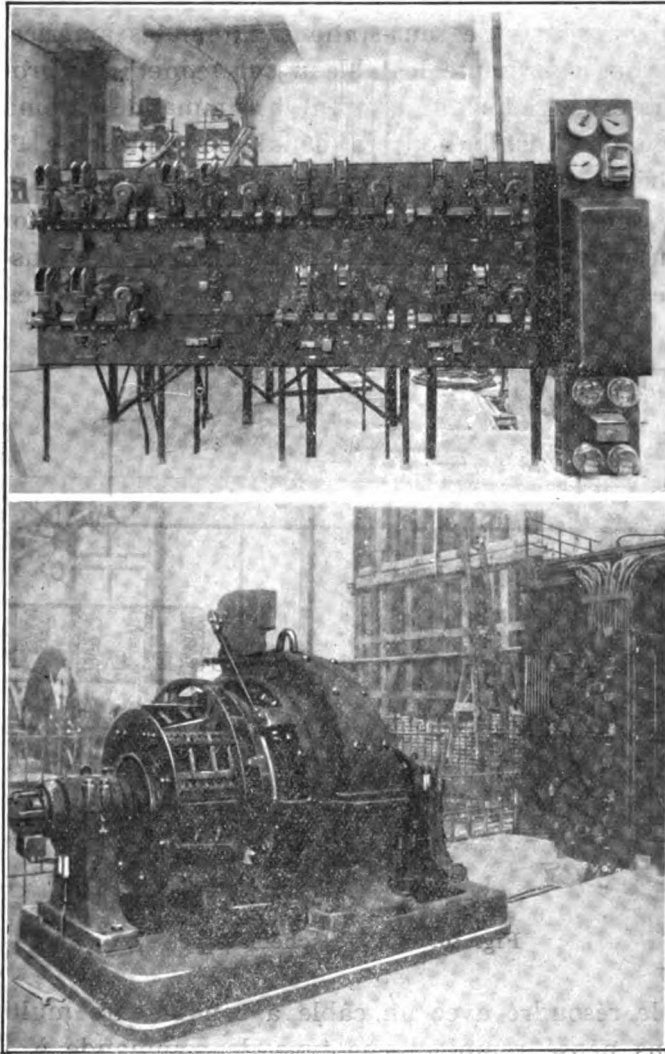


Fig. 29. — Vue d'une sous-station automate américaine.

que d'un moteur ou d'une génératrice dans des conditions de charges déterminées, avec protection à maxima et minima, réenclenchement empêché, etc.

» Un certain nombre de relais, relais à maxima, à minima, à

retour, relais retardateurs, relais totalisateurs, relais polarisateurs, etc., dont beaucoup sont basés sur le principe d'écoulement de notre cataracte à mercure, principe extrêmement fécond, complètent le système et nous permettent de solutionner les cas les plus complexes.

» Voici deux vues de sous-stations américaines, la première vous représente le tableau sur lequel sont groupés les contacteurs et les relais qui assurent la commande automatique et le contrôle de l'installation; la deuxième représente l'une des commutatrices de la sous-station (fig. 29).

» Je ne veux pas quitter cette question des sous-stations automatiques, sans vous parler de celle de la commande des sous-stations à distance. Le problème a été assez souvent posé. On est sur le

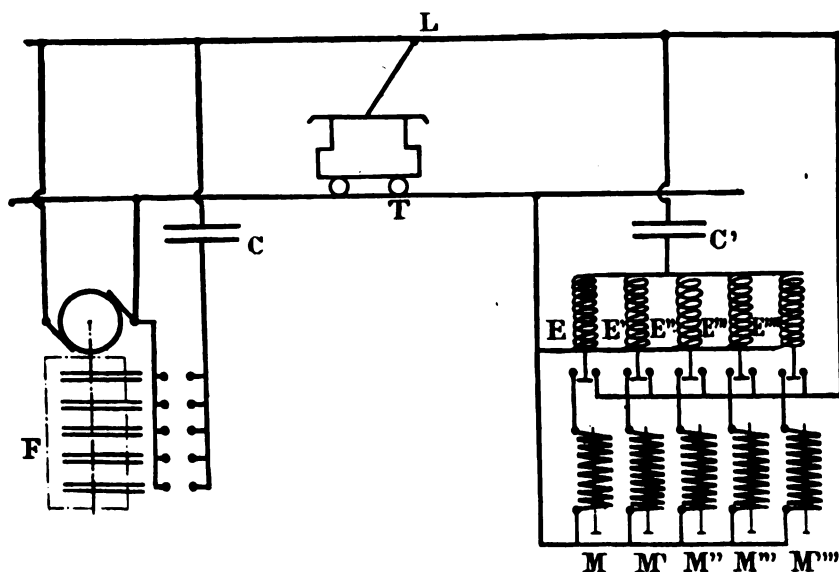


Fig. 30. — Vue schématique.

point de le résoudre avec un câble à conducteurs multiples, et nous avons pensé remplacer ce type de commande à distance assez coûteux pour une commande à un seul fil, au moyen d'un système analogue à celui que nous avons préconisé pour le fonctionnement des relais. C'est par association d'idées que nous y sommes arrivés.

» Le schéma représenté par la figure 30 est relatif à une installation que nous sommes en train d'équiper sur ce principe. Nous avons un générateur qui est susceptible d'envoyer dans la ligne

des courants de fréquences différentes. A l'arrivée, un certain nombre d'électro-aimants font agir autant de solénoïdes que nous avons d'actions à opérer. On peut combiner une action qui fonctionnera avec deux ou trois fréquences différentes. De sorte qu'on peut commander à une distance quelconque, une sous-station, sans employer de fil (fig. 30).

» Pour terminer, je vous dirai quelques mots du dernier point qui faisait l'objet de ma communication : c'est celui des disjoncteurs ultra-rapides.

LES DISJONCTEURS A RUPTURE RAPIDE.

» Ce problème prend, avec le projet d'électrification des chemins de fer, une grande acuité; il a sa raison d'être dans les faits suivants :

» L'amorçage d'arc au collecteur des machines à courant continu et principalement des commutatrices, le flash, supportable, quoique très préjudiciable, pour les installations à 500 volts, est devenu tout à fait intolérable pour les installations à 1 500 ou à 2 400 volts ; les Américains ont étudié ce problème et on s'y est attelé depuis peu en France. De tous les remèdes qui ont été examinés, un seul semble solutionner le problème, c'est celui de la disjonction ultra-rapide.

» En effet, le flash se produit sur une machine au moment d'un court-circuit ou d'une très forte surcharge, par suite de l'arc qui prend naissance au passage d'une touche du collecteur sous une ligne de balais et qui s'allonge sans se rompre, jusqu'à atteindre la ligne de balais suivante, amorçant ainsi un arc et l'embrassement général du collecteur; il est donc nécessaire que cet arc soit rompu avant d'avoir pu atteindre la ligne de balais suivante; il faut pour cela que le disjoncteur ait agi et ramené l'intensité à une valeur raisonnable dans un temps moindre que celui que met une lame de collecteur pour aller d'une ligne de balais à la suivante, soit en moyenne 8 à 10 millièmes de seconde.

» Pour réaliser cela, les Américains ont séparé leurs appareils en deux. Ils prennent d'un côté un mécanisme ultra-rapide, qui dans un temps très court insère en circuit une résistance qui fait tomber l'intensité à une valeur raisonnable; d'un autre côté, un disjoncteur ordinaire, qui achève de couper dans un temps de l'ordre du cinquième de seconde. Inutile de vous dire qu'il est très malaisé d'arriver à des temps aussi courts sans établir des appareils volumineux; nous nous y sommes efforcés. Ci-contre, vous

pouvez voir un oscillogramme relevé sur un premier appareil d'essais de faible puissance et très rudimentaire que nous avons construit il y a quelque temps déjà; nous avons obtenu un temps de coupure de 26 ou 27 millièmes de seconde, ce qui était déjà un progrès (fig. 31).

» Depuis, nous avons construit un nouvel appareil d'essais, dans lequel nous nous sommes attachés, à l'encontre de ce qu'ont fait les Américains, à réunir deux appareils en un seul.

» Voici une vue schématique de cet appareil. Deux plots fixes sont réunis entre eux par une résistance; deux plots mobiles réunis par des connexions avec la ligne amènent le courant; deux autres plots mobiles prenant appui sur l'autre face des plots fixes et réunis entre eux par une connexion viennent, en position nor-

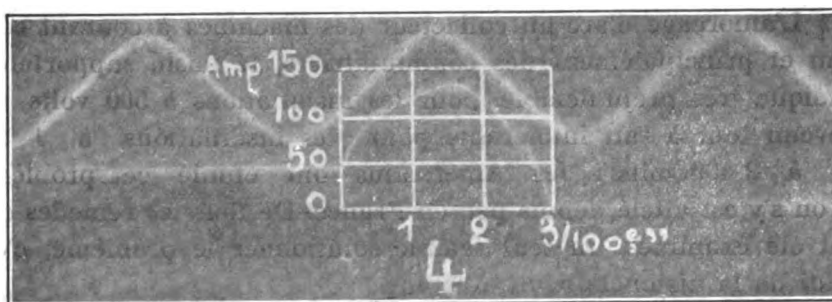


Fig. 31. — Oscillogramme.

male, court-circuiter la résistance, de façon à ce que le courant ne passe pas par cette dernière, mais passe par la connexion (fig. 32).

» Je dois attirer tout de suite votre attention sur un point. On a intercalé cette résistance pour diminuer, dans une certaine mesure, les effets d'extra-courant, qui se produisent à la rupture. Je crois qu'on a compliqué inutilement le problème. Nous l'avons fait parce que nous avons pensé qu'il serait trop subversif de procéder autrement, et qu'on nous dirait, comme tant de fois : Ce n'est pas comme cela qu'on fait en Amérique. Pourquoi avez-vous fait autrement ? Et pourtant, cette résistance doit être bien peu opérante, si on songe que, pour un circuit normal de 1 000 ampères, elle limitera le courant à une valeur assez faible, de 2 000 ampères par exemple, alors que l'intensité instantanée qui prendra naissance du fait du court-circuit atteindra peut-être 20 000 ampères, peut-être plus; alors pour couper 18 000 ampères au lieu d'en couper 20 000, la différence ne doit pas être bien sensible.

» Je passe maintenant à la solution à laquelle nous nous sommes arrêtés pour réaliser le problème du côté ultra-rapide, c'est-à-dire obtenir le fonctionnement en quelques millièmes de seconde.

» L'équipage mobile est sollicité par deux forts ressorts. Ces ressorts sont calculables, étant donnés le poids de l'équipage mobile et la vitesse qu'on veut obtenir. C'est un problème de dynamique. Une fois que l'on connaît la force des ressorts, on calcule

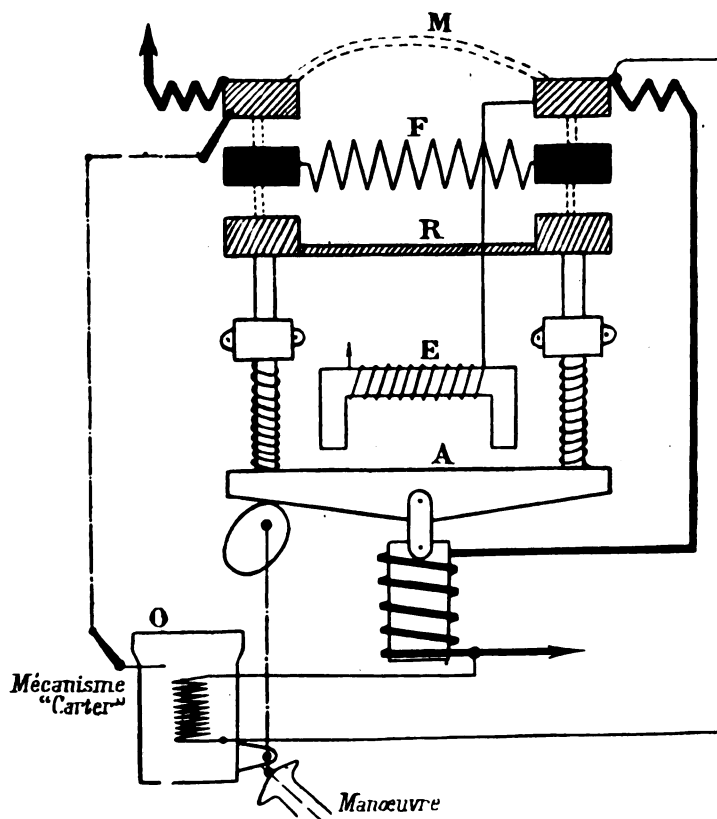


Fig. 32. — Vue schématique d'un disjoncteur ultra-rapide.

un électro-aimant en fil fin capable de résister à cet effort, en maintenant un barreau de fer doux que vous voyez sur le croquis. Quand l'armature sera au collage, les contacts resteront en prise. Si, pour une raison quelconque, nous arrachons l'armature de son électro-aimant, il y aura rupture à la vitesse cherchée. On calcule l'électro-aimant en employant un petit coefficient de sécurité. S'il faut 2 000 kilogrammes, on mettra 2 200 ou 2 500

kilogrammes. Il est donc nécessaire de produire une action antagoniste qui soit suffisante, pour donner les 500 kilogrammes qui manquent. Cette action est produite par un autre électro-aimant qui, lui, est parcouru par le courant principal. Cet électro-aimant est calculé pour qu'il donne les 500 kilogrammes lorsque l'inten-

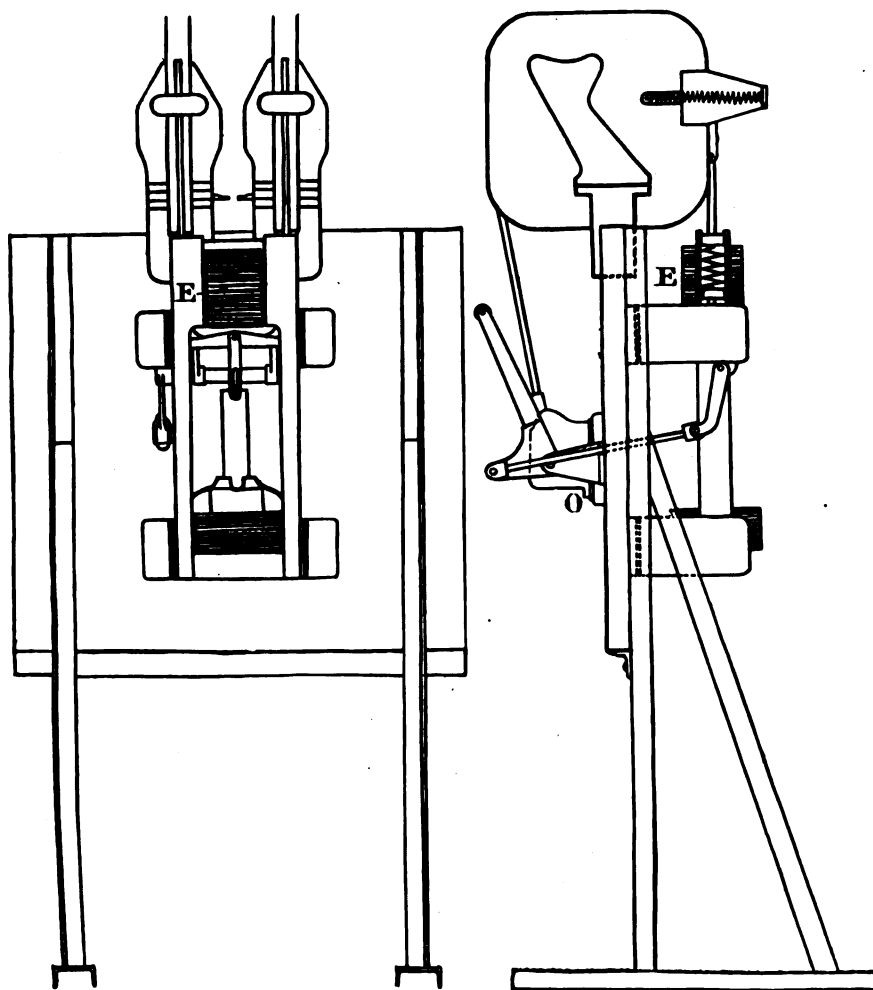


Fig. 33. — Schéma d'un disjoncteur ultra-rapide.

sité atteint la valeur pour laquelle on veut le fonctionnement instantané.

» La bobine en fil fin est connectée à un endroit de la ligne où la tension risque de s'abaisser au moment où le court-circuit a lieu, c'est-à-dire après tout le système, le plus loin possible des balais,

si bien qu'au moment d'un court-circuit, en plus de l'action mécanique que je viens de vous citer, la tension baisse et le décollage se produit d'autant plus vite.

» Quand l'intensité dépasse la limite normale prévue, l'électro-aimant à gros fil arrache l'électro-aimant à fil fin, et la rupture a lieu d'une façon ultra-rapide, puisqu'à ce moment-là, le ressort a toute sa liberté. Abstraction faite du temps qui est nécessaire pour que l'arc se coupe, on arrive, avec un tel équipement mobile, à obtenir une constante de temps, pour cet appareil,

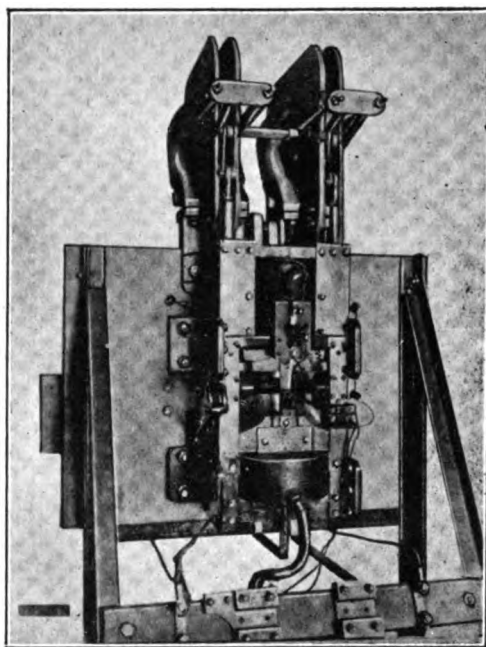


Fig. 34. — Vue d'un disjoncteur ultra-rapide.

de l'ordre d'un millième de seconde. C'est vous dire que l'action est tout à fait rapide.

» Il faut que, pendant le cours de cette opération, le soufflage de l'arc se produise. C'est une question d'ampères-tours et de dimensionnement des masses polaires, on se préoccupe de l'obtenir en introduisant le minimum de réactance dans le circuit.

» Voici des vues de l'appareil (fig. 33 et 34), on aperçoit la bobine fil fin devant maintenir l'armature au collage, et en dessous la bobine antagoniste parcourue par le courant principal; les ressorts de rappel, au nombre de deux, sont placés de chaque côté,

ils sont logés à l'intérieur de pièces métalliques qui les dissimulent. Avec ce nouvel appareil, nous venons de faire des essais préliminaires, notamment des mesures de vitesse de déplacement de l'équipage mobile; ces essais ont pu être réalisés très facilement, grâce au chronographe de M. Joly, dont je vous ait parlé au début de cette conférence. Voici deux reproductions photographiques des

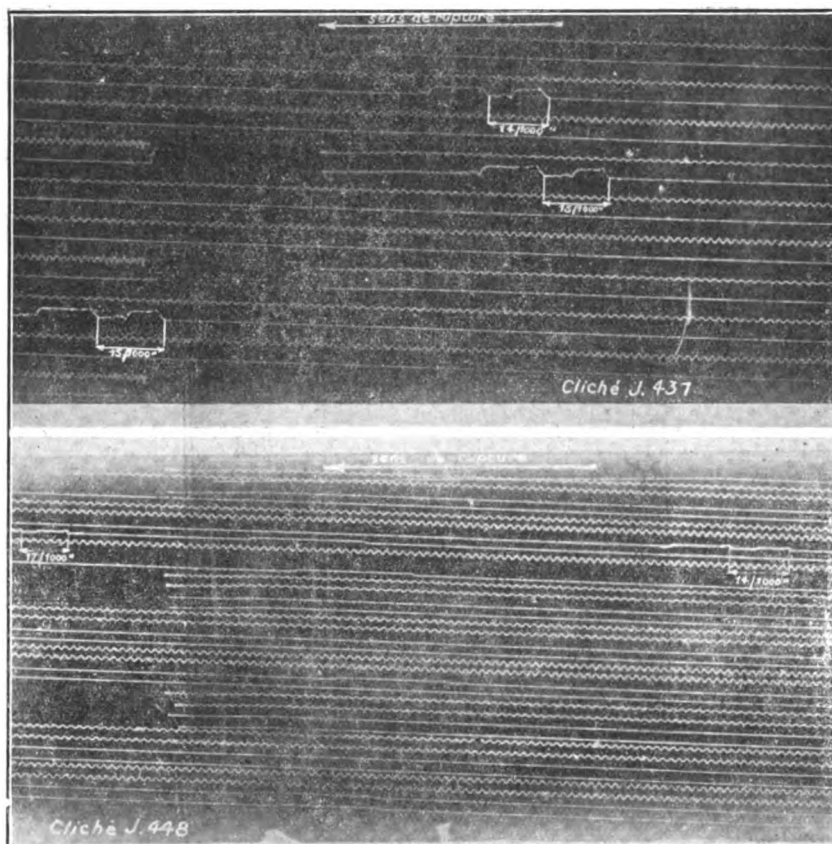


Fig. 35. — Reproduction des graphiques.

graphiques obtenus (fig. 35); la petite sinusoïde de contrôle est tracée par un diapason donnant 500 oscillations doubles par seconde; ainsi qu'on peut s'en rendre compte sur le premier essai, qui avait été obtenu en coupant simplement le circuit de la bobine fil fin, le temps de déplacement total de la partie ultra-rapide avait été de $8/500$ de seconde, soit $16/1\ 000$, et dans le deuxième cas où nous avons provoqué l'arrachement de l'armature par l'électro-ai-

mant antagoniste à gros fil, nous avons eu une accélération supplémentaire et le temps de fonctionnement n'a plus été que 5,5/500 ou 11/1 000 de seconde. Or, comme l'arc doit sûrement être coupé avant la fin de sa course, sans cela il pourrait rester amorcé, nous devons donc avoir des temps plus courts; du reste, nous nous sommes livrés dans nos ateliers à plusieurs essais très encourageants.

» Nous apportons à notre appareil quelques adjonctions de détail qui nous ont été suggérées par nos expériences, et nous allons d'ici très peu de temps procéder à de nouveaux essais sur une commutatrice à 600 volts; nous espérons, après ces tentatives, terminer la mise au point définitive de cet appareil, de façon à pouvoir entreprendre sa fabrication en série.

» Messieurs, c'est tout ce que je voulais vous dire. J'avais un sujet qui permettait de grands développements. J'ai essayé d'être bref. Mon collègue, M. Latour, voudra bien m'excuser d'avoir accaparé la tribune aussi longtemps, le fait a été indépendant de ma volonté. J'espère que vous voudrez bien retenir ce que je vous ai dit concernant l'appareillage électrique, parent pauvre, qui abonde quelquefois en problèmes si féconds, qu'il suffit de les examiner pour être captivé par leur intérêt. »

Le PRÉSIDENT remercie M. Védovelli.

PROCÉDÉ OUTTIER POUR L'AMÉLIORATION DU COS φ D'UNE INSTALLATION

A L'AIDE DE CONDENSATEURS (1)

M. Maurice LEBLANC fils. — « Pour répondre à l'invitation faite par notre Président, dans la dernière séance, à la suite de la conférence de M. Harlé sur l'emploi des condensateurs pour améliorer le cos φ d'une installation, je désirerais vous présenter quelques observations faites sur ce sujet par M. Outtier, un de mes anciens collaborateurs, qui présentent, je crois, un certain intérêt.

» Comme on le sait, le mauvais cos φ d'une installation provient le plus souvent de l'utilisation de moteurs asynchrones fonctionnant à faible charge ou ayant déjà même à pleine charge un cos φ défectueux.

» Le remède préconisé consiste à munir chaque moteur d'une batterie de condensateurs, dont la capacité peut être calculée comme nous l'a indiqué M. Harlé. Chaque condensateur exige en outre un commutateur spécial ou un rhéostat de démarrage nécessaire pour mettre à la mise en marche du moteur les condensateurs progressivement en circuit ; sans cette précaution, on risque la production de surtensions dangereuses pour le moteur ou le condensateur.

» Si on a beaucoup de petits moteurs, l'ensemble de l'installation coûte extrêmement cher. N'y a-t-il pas moyen de diminuer ce prix élevé dû, d'une part au grand nombre de condensateurs (un gros condensateur coûte beaucoup moins cher que plusieurs petits à puissance totale équivalente) et ensuite au fait que les moteurs étant à basse tension, les condensateurs doivent être eux-mêmes à basse tension ?

» En effet, s'il est indiqué dans tous les traités d'électrotechnique que le prix d'un condensateur est théoriquement proportionnel à sa puissance, cette remarque ne s'applique pas du tout dans la pratique aux condensateurs à très basse tension, on en sait d'ailleurs les raisons.

On peut en juger par les chiffres suivants, relevés dans le catalogue d'une des meilleures marques actuelles :

(1) M. Outtier étant empêché, cette communication a été présentée en séance par M. Maurice Leblanc fils, directeur de la Hewitt Co.

Tension en volts	Prix en francs par microfarad	Prix en francs par kilovolt-ampère à 50 p/s
110/125	5,10	1 340
200/220	7,25	576
440/500	11,50	188

» La solution évidente serait de mettre un seul condensateur sur le côté haute tension de la cabine, mais le secteur ne l'accepte pas, de crainte des surtensions qui résulteraient de la mise en résonance possible de certains harmoniques du réseau.

» La solution préconisée par M. Outtier consiste à mettre un seul condensateur, mais sur le côté basse tension de la cabine, en le reliant aux barres par l'intermédiaire d'un transformateur,

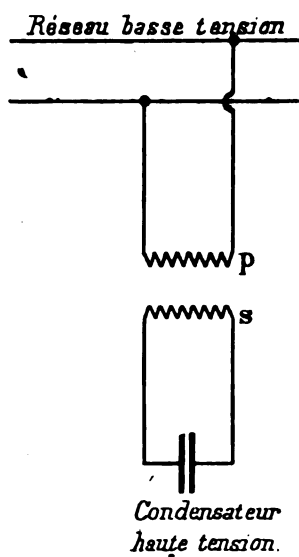


Fig. 1.

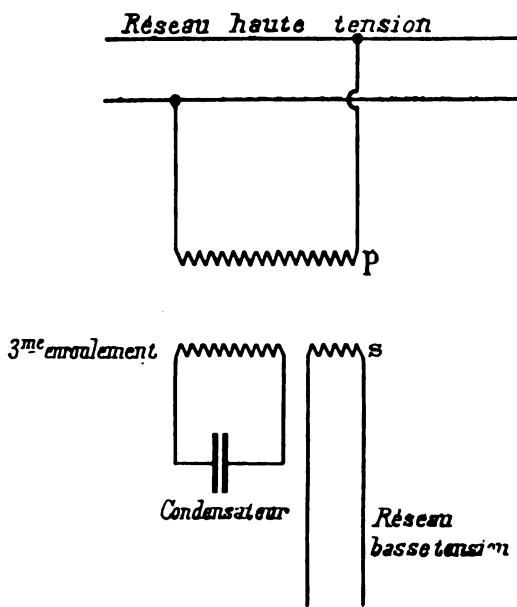


Fig. 2.

comme il est indiqué sur la figure 1. On sait que, dans un transformateur, le déphasage du primaire est sensiblement égal à celui du secondaire et, par conséquent, le condensateur ainsi placé remplit parfaitement le rôle qu'on en attend.

» Dans le cas d'une nouvelle installation, on pourrait même prévoir sur le transformateur principal de la cabine un troisième enroulement aux bornes duquel on placerait le condensateur (fig. 2).

» Le transformateur a, en outre, pour résultat d'empêcher les résonances du réseau basse tension qui pourraient se produire si

on plaçait directement un condensateur basse tension en dérivation sur ses barres.

» La solution de M. Outtier permet, en résumé, l'emploi d'un seul condensateur et à la tension qu'on juge la plus économique. Malgré la nécessité d'un transformateur supplémentaire, elle procure néanmoins une diminution de la dépense totale d'installation très considérable.

» Notons cependant qu'elle ne permet pas d'avoir une compensation permanente du facteur de puissance ; elle permet seulement de produire une énergie réactive négative égale à l'énergie moyenne réactive de l'installation, ce qui donne une vitesse moyenne nulle des indicateurs.

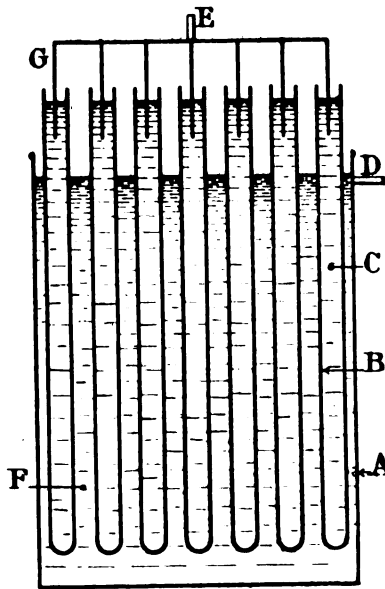


Fig. 3. — Condensateur Outtier.

» Si cette solution n'est pas absolument parfaite au point de vue du secteur, elle permet néanmoins d'améliorer considérablement la situation actuelle.

» J'indiquerai, pour terminer, que M. Outtier fait essayer actuellement au Laboratoire central un condensateur d'une construction particulièrement économique, constitué par un faisceau de tubes de verre plongeant dans une cuve métallique formant électrode, un électrolyte à l'intérieur et à l'extérieur des tubes forme armature. (fig. 3). »

La séance est levée à 23 heures.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Réactances employées dans les circuits des fours électriques,

par H.-A. Winne (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1920).

L'auteur examine brièvement les diverses méthodes d'introduction de la réactance dans les circuits des fours électriques : par transformateurs à forte réactance, par arrangement des conducteurs, par réactances à noyau de fer et à noyau d'air; et il conclut que la meilleure méthode est celle de la réactance à noyau d'air, scellée dans le ciment.

Soudure électrique par percussion,

par D. F. Miner (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1920).

Dans les machines primitives employées pour souder des fils par le procédé de l'électropercussion, on utilisait la décharge d'un condensateur électrolytique, mais le champ d'application était assez limité (soudure des fils de lampes à incandescence et autres fils de faible diamètre), vu l'état du développement des condensateurs et le coût prohibitif des appareils de dimension suffisante pour souder de grandes pièces. Depuis, l'équipement a progressé de telle sorte qu'il permet de souder des pièces atteignant jusqu'à 12 mm de diamètre, et il utilise maintenant l'énergie électromagnétique accumulée, au lieu de l'énergie électrostatique. L'établissement d'un champ continu intense dans une bobine de réactance à enroulements primaire et secondaire, est suivi de la rupture du courant primaire alors que le circuit secondaire est fermé. Il en résulte le transfert au secondaire de l'énergie du champ affaibli, et la séparation subséquente des électrodes situées dans ce circuit secondaire établit un arc intense. Quand les surfaces des électrodes (pièces à souder) sont à un état de fusion suffisant, un marteau forge les pièces en présence. La durée totale de ces opérations est d'environ 0,1 seconde, aussi peut-on dire que la soudure est pratiquement instantanée.

Les données suivantes se rapportent à la soudure d'une pièce en acier laminé à froid, avec une pièce de cuivre, le diamètre de chacune de ces pièces étant de 9 mm : courant secondaire maximum, 2 600 ampères; tension d'arc, 30 volts; puissance maximum, 60 000 watts; puissance moyenne, 29 600 watts; durée totale, 9,094 seconde; énergie absorbée, 2 870 watts-seconde, ou 0,0077 kw-heure. Des microphotographies confirment la qualité de la soudure et indiquent une pénétration mutuelle des métaux, sans alliage apparent. Le mémoire est accompagné de reproductions photographiques de divers échantillons de soudures obtenues par le procédé en question.

Usure des charbons et des collecteurs,

par R. E. Hellmund (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1920).

L'auteur expose les résultats de divers essais relatifs à l'usure et aux valeurs de crachement de différentes sortes de balais en charbon. Il donne également des courbes montrant les chiffres obtenus dans divers essais, et concernant la relation entre l'usure des balais et la vitesse de rotation, enfin la relation entre les pertes en watts et la vitesse de rotation.

Le « Fullerphone »,

Par A. C. Fuller (Inst. Elect. Eng., avril 1920).

L'auteur décrit une méthode de télégraphie, particulièrement destinée aux buts militaires, et d'après laquelle des signaux Morse rapides, à courant continu, sont rendus audibles à l'extrémité réceptrice, en les morcelant au moyen d'un interrupteur. Le téléphone récepteur et l'interrupteur ne sont pas placés directement dans le circuit de ligne, mais placés en shunt sur un dispositif d'inductances et de condensateurs faisant office de filtre, de telle sorte qu'il n'existe aucune impulsion de haute fréquence sur la ligne. Ce dispositif, combiné avec un gradateur situé à l'extrémité transmettrice, procure un système de télégraphie plus ou moins imperceptible à l'oreille ennemie, et le système devient plus parfait encore si un circuit en boucle est substitué à la ligne à simple fil reliée à la terre. La combinaison des dispositifs rend possible la télégraphie simultanée. Des chiffres sont donnés, dans le mémoire, relativement aux essais effectués sur des lignes artificielles. L'auteur suggère l'utilisation en grand de l'appareil pour la télégraphie civile.

Au cours de la discussion, plusieurs orateurs indiquèrent que l'ordre d'idées sur lequel fut basé l'appareil n'était pas précisément nouveau.

La téléphonie sans fil à bord des aéroplanes,

Par C.-E. Prince (Inst. Elect. Eng., mai 1920).

Ce mémoire a pour objet une étude historique du développement de la téléphonie sans fil à bord des aéroplanes, et il expose les difficultés techniques rencontrées, ainsi que la manière dont elles furent surmontées. Des détails, et une description accompagnée de schémas de montage, sont fournis relativement à des installations typiques.

Relais à valve,

Par L.-B. Turner (Inst. Elect. Eng., avril 1920).

L'auteur donne une description complète — illustrée de nombreux schémas — des modes de construction et de fonctionnement du relais à valve. Il décrit ensuite certains types de relais appropriés : (1) aux fréquences acoustiques, (2) aux signaux de haute fréquence, (3) aux signaux de télégraphie sans fil, (4) aux courants constants ou à variation lente. La sensibilité et le pouvoir sélectif du relais à valve de haute fréquence syntonisé, sont discutés, ainsi que les limites de sensibilité et de vitesse de travail. (Pour les détails, il y a lieu de consulter le mémoire original.)

Capacité de courant des câbles sous plomb,

Par R. W. Atkinson (Amer. Inst. Elect. Eng., septembre 1920).

Cette communication fournit des données permettant de calculer la capacité de courant des câbles sous plomb, sur la base des limites thermiques, abstraction faite des limites afférentes à la chute de tension et aux considérations économiques. L'auteur montre comment la détermination de ces données peut conduire à d'autres.

Un appendice renferme quelques exemples numériques illustrant l'emploi des données. Il contient également un diagramme permettant de déterminer graphiquement, pour des conditions définies, la capacité de courant des câbles à

trois conducteurs, à isolement de papier et de toile vernie, installés dans des tubes isolants.

A signaler encore un graphique montrant la relation entre les diverses températures dites « de base » et les élévations de température produites en ses diverses parties, dans un groupe de câbles sous plomb, les températures de base étant celles des câbles placés en état de fonctionnement, mais non en charge.

Pertes dans le fer aux fréquences élevées,

par T. Spooner (Amer. Inst. Elect. Eng., septembre 1920).

L'auteur décrit des expériences relatives aux pertes dans le fer observées sur une tôle d'acier à 4 pour 100 de silicium ayant 5 mm d'épaisseur, et ce, pour une amplitude de fréquences de 5 000 à 50 000 périodes par seconde. Une séparation approximative des pertes par hystérésis et par courants de Foucault a été établie: elle montre l'influence de l'effet Kelvin sur ces pertes.

La source d'énergie à haute fréquence, employée dans ces expériences, était un nouveau type d'oscillateur à arc.

L'exactitude des résultats obtenus fut d'environ 5 pour 100.

Champ extérieur produit par un électroaimant cylindrique,

Par C.-T. Hutchinson et H. Pender (Amer. Inst. Elect. Eng., septembre 1920).

Ce mémoire expose certains problèmes que les auteurs eurent l'occasion d'envisager et de résoudre pendant la guerre.

Problème A : — Etant données les dimensions et la perméabilité d'un noyau de fer cylindrique droit, combien faut-il d'ampères-tours, uniformément distribués sur la longueur du noyau, pour produire une force magnétisante donnée en un point de l'axe du noyau situé à une distance de son centre relativement grande eu égard à sa longueur ?

Réponse :

$$\frac{6.37 x^2}{d^2} \left(\frac{1}{\mu} + \frac{K}{\rho} \right) H \text{ ampères-tours,}$$

H , étant la force magnétisante en gilberts par cm ; x , la distance du point considéré par rapport au centre du noyau, en cm ; d , le diamètre du noyau en cm ; μ , la perméabilité moyenne du noyau, en unités électromagnétiques c. g. s. ; ρ , le rapport de la longueur du noyau à son diamètre ; K , un facteur dépendant de ρ , ses valeurs variant de 3,6 à 5,3 lorsque ρ varie de 20 à 100 (selon graphique annexé).

Problème B : — Quand le noyau est excité au moyen d'un courant alternatif, combien faut-il de watts pour produire une force magnétisante maximum en un point de l'axe du noyau situé à une certaine distance de son centre ?

Réponse :

$$\frac{\pi^2 f x^2}{V} \left(\frac{1}{\mu} + \frac{K}{\rho^2} \right) H^2 \times 10^{-7} \text{ watts.}$$

f étant la fréquence du courant, en périodes par secondes, et V le volume du noyau en cm³, les autres symboles étant les mêmes que dans le Problème A.

Problème C : — Quelle est la disposition du bobinage sur le noyau qui nécessitera le nombre minimum de watts pour une force magnétisante donnée en un point donné ; autrement dit, le bobinage doit-il être uniforme, concentré au centre du noyau ou concentré aux extrémités ?

Réponse : Pour un champ extérieur maximum par volt-ampère d'excitation, le bobinage doit recouvrir le noyau sur toute sa longueur, et être uniformément distribué.

Problème D : — Pour un nombre de watts et un poids de noyau donnés, de combien la force magnétisante en un point donné de son axe sera-t-elle augmentée en employant un noyau conique (c'est-à-dire à extrémités en forme de cônes), au lieu d'un noyau de section uniforme ?

Réponse : Pour le même volume de noyau et le même nombre d'ampères-tours, un noyau conique procurera une force magnétisante un peu supérieure, mais la différence est si faible que le léger gain dû au noyau conique ne justifierait guère le supplément de dépense entraîné.

Suit l'exposé, très développé, de la méthode et des calculs par lesquels les auteurs sont parvenus aux conclusions ci-dessus.

Transformateurs pour fours électriques,

par J.-L. Thompson (Inst. Elect. Eng., mars 1920).

L'auteur traite fort au long, et avec abondance de détails, de la construction des transformateurs : son mémoire est de ceux qui ne se prêtent guère à un court résumé. Parmi les sujets discutés, sont : les caractéristiques électriques des transformateurs ; les exigences mécaniques et celles relatives au mode de construction, à l'emplacement et au fonctionnement ; enfin les mérites relatifs des types à noyau et culrassé. Puis l'auteur considère les nécessités futures présumables, ainsi que le calcul des grands transformateurs pour fours électriques. Dans les grands transformateurs, l'arrangement des conducteurs basse tension en parallèle soulève des difficultés. Celles-ci sont plus prononcées pour le type culrassé que pour le type à noyau. La méthode de l'auteur, qui consiste à employer un tour et demi, est décrite (et plus particulièrement au cours de la discussion). En ce qui concerne la régulation, l'auteur préconise l'emploi d'un transformateur auxiliaire ou d'un transformateur régulateur haute tension à réactance externe, ou encore d'un rhéostat-régulateur d'induction, de manière à pouvoir éviter les dérivations sur le transformateur du four. Le transformateur de four idéal est celui comportant un seul rapport de tensions, avec une réactance modérée. Le mémoire donne quelques chiffres relatifs aux efforts mécaniques reconnus par l'expérience. En dernier lieu, l'auteur expose un projet de transformateurs en vue du travail des fours, et là il s'attache à réduire la réactance nuisible dans les conducteurs. Des diagrammes montrent le prix et le poids de transformateurs de diverses puissances.

La mise à la terre des conducteurs,

« Report of the Earthing Sub-Committee of the Wiring Rules Committee »

(Inst. Elect. Eng., juin 1920).

Il s'agit d'un extrait du rapport relatif à la question de la mise à la terre et comprenant : l'élément de temps des disjoncteurs, l'échauffement des conducteurs, la capacité de courant des appareils mis à la terre, la chute de tension dans une enveloppe métallique, enfin le nombre de fils à la terre nécessaires. Il serait mauvais de dépasser les maxima de température admis pour les câbles isolés au caoutchouc ou au papier, mais le courant de travail admissible doit être basé sur une température atmosphérique maximum de 27° C. Pour les fusibles à la terre, on recommande l'étain de faible fusibilité ou exempt d'oxydation. Des courbes montrent le courant de fusion du fil en étain pur, et pour des durées de fusion de 3 minutes d'une part, et de 1.5 heures d'autre part. Le Comité conseille de ne pas employer, pour les fils de terre, un calibre inférieur à 1/4 S. W. G. (3.14 mm²). Dans le cas des câbles au papier, les conducteurs à la terre doivent avoir une section égale à celle du conducteur de travail lorsque cette dernière ne dépasse pas 31 mm² ; leur section doit être de 66 pour 100 de celle du conducteur de travail, jusqu'à 93 mm² ; enfin elle doit être de 50 pour 100 pour les sections au-dessus. En ce qui concerne les câbles au caoutchouc de sections comprises entre 8 et 14 mm², le câble à la terre doit être de 66 pour 100 du conducteur principal ; entre 22 et 62 mm², 50 pour 100 ; entre 78 et 187 mm², 33 pour 100 ; au-dessus de 187 mm², 25 pour 100. Comme conducteur individuel, ne pas dépasser le calibre 19/17 S.

W. G. (29 mm²). Si l'on emploie, comme terres, des plaques ou des cylindres, il en faut autant que de conducteurs à la terre. Les plaques enterrées doivent avoir un contact de terre d'au moins 0,4 m², et être entourées de toutes parts d'au moins 0,3 m de coke finement concassé. Elles doivent être, de préférence, en fonte, ou autre métal durable. Il n'y a guère nécessité que le coke soit exempt de sulfure, car si celui-ci existe généralement dans la proportion de 2 pour 100, sa forme est telle qu'il ne se convertit pas rapidement en acide sulfurique. Le fil de terre doit être serré sur une conduite, ou sur un fourreau ou une armature de câble. Les conduites d'eau constituent de bonnes terres ; mais on ne doit pas utiliser dans le même but les charpentes en acier des bâtiments. Il est dit aussi, dans le rapport, qu'il serait bon de prescrire la mise à la terre de toutes parties métalliques susceptibles d'être chargées électriquement, telles que les ouvrages en acier ou autres parties métalliques employés conjointement avec les circuits basse tension.

Porcelaine pour isolateurs haute tension,

par W. D. A. Peaslee (Amer. Inst. Elect. Eng., mai 1920).

L'auteur estime que de nouvelles améliorations dans les résultats à attendre des isolateurs en porcelaine ne peuvent naître que de méthodes de fabrication meilleures. Sous le stimulant des demandes, une grande somme de travail a été consacrée aux mélanges entrant dans la porcelaine, et l'on dispose maintenant de certaines sortes de porcelaines dont la résistance à la compression atteint 4 800 kg par cm² et la résistance à la traction 900 kg par cm². Ce n'est d'ailleurs pas la limite extrême et l'on entrevoit mieux encore. Aucun mélange ne doit être employé si, lorsqu'équipé avec ses ferrures, il ne résiste pas à un nombre indéfini d'immersions alternatives dans l'eau bouillante et l'eau glacée. Certaines sortes même, après avoir été chauffées au rouge, pourront être plongées dans l'eau sans claquer. La porcelaine doit être absolument exempte de porosité et, de l'avis de l'auteur, c'est une erreur de déclarer cela impossible commercialement. Telle forme de porosité résulte d'un excès de chauffage et telle autre résulte d'une insuffisance de chauffage ; mais certains fabricants contestent que l'excès de chauffage cause la porosité. Si une teinture à la fuchsine peut être aspirée dans un isolateur sous pression, cela indique de la porosité, et constitue une méthode d'essai commerciale fort utile. La résistance d'isolement de la porcelaine varie avec la température et l'auteur présente des courbes montrant que certain nouveau mélange de porcelaine (dont la formule n'est pas révélée) donne des chiffres bien meilleurs que la porcelaine « conventionnelle » composée d'argile, de silice et de feldspath. Par exemple, tel échantillon de porcelaine conventionnelle a une résistance de 2 mégohms à 700° F (370° C), tandis qu'un échantillon semblable, mais constitué du nouveau mélange, mesure 2 mégohms à 1 100° F (593° C). L'effet piezoélectrique est également discuté : c'est ainsi que certaines sortes de détériorations s'expliquent par les propriétés électriques des cristaux de quartz. Si le quartz est soumis à une pression mécanique sur deux faces diamétralement opposées du cristal, faces qui sont parallèles aux axes majeurs, il s'établit une différence de potentiel sur les faces perpendiculaires à celles où la pression est appliquée. La réciproque de ce qui précède est également vraie, et des efforts locaux considérables peuvent se produire si des changements de dimensions sont fortement contrariés par le magma environnant. Un mouvement vibratoire peut s'établir dans les cristaux sous l'effet d'un champ électrostatique alternatif, d'où rupture possible du cristal ou de la substance ambiante. Il faudrait trouver un corps dans lequel le quartz serait dissous aussi complètement que possible dans le magma feldspathique. L'auteur se propose de poursuivre l'étude de cet aspect du problème.

BIBLIOGRAPHIE

Conduites d'eau et de gaz, en fonte, en acier et en ciment armé. Calculs de résistance des tuyaux et des joints, par J. Assaier. Brochure 27 cm × 21 cm, de 12 pages et 6 figures, extraite de la Revue « Les Travaux publics » n° de mars-avril 1921.

Bien que le sujet ici traité ne rentre pas précisément dans le cadre du Bulletin, nous croyons devoir signaler à nos lecteurs cette petite notice, en raison des calculs et renseignements utiles qu'elle contient et des questions d'hygiène, donc d'intérêt général, qui s'y rattachent.

Formulaire aide-mémoire de l'Electricien praticien, par E. Marec, ancien Chef de travaux à l'Ecole supérieure d'Electricité de Paris, Directeur de station centrale d'électricité. 1 vol. in-18 de 466 pages avec 400 figures et tableaux, 12 francs. Librairie J.-B. Baillière et Fils, 1920.

Ce formulaire est, dans l'esprit de son auteur, destiné à permettre au personnel electricien, ouvriers et monteurs, de se servir avec fruit des formules et directives qui résument les éléments fondamentaux de l'électrotechnique. La première partie du livre traite donc des lois de l'électricité et de leur application immédiate à de nombreux cas concrets. La deuxième partie passe en revue le matériel industriel courant actuellement en usage.

Dans cette revue, l'auteur s'est particulièrement attaché aux points suivants :

1° Mettre en relief les propriétés caractéristiques du matériel afin d'en permettre le choix raisonné ;

2° Donner les principaux schémas relatifs à son montage ;

3° Montrer les meilleures dispositions pratiques qu'il convient d'adopter dans la réalisation des installations ;

4° Indiquer les principales précautions à prendre pour assurer la bonne conservation de ce matériel et éviter les avaries qui peuvent lui survenir ;

5° Faire connaître les moyens de contrôle propre à déterminer la source des avaries survenues.

Cet ouvrage, fait par un praticien, s'adresse aux praticiens et il n'est pas douteux que ces derniers l'utiliseront avec fruit.

Le Rôle de l'utilisation des chutes d'eau dans l'extension de l'Activité Individuelle et agricole, par Paul Levy-Salvador, Chef du Service technique de l'Hydraulique agricole, 1 vol. in-8° de 112 pages avec 14 figures. Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1920.

Ce volume, qui reproduit le texte d'une conférence donnée par son auteur à la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale, passe en revue les éléments essentiels de la si importante question des forces hydrauliques en France. Les points de vue techniques, économiques et administratifs du sujet sont illustrés par de nombreux exemples tirés des installations existantes, et le livre est heureusement complété par le texte du projet de loi, actuellement voté, soumis en 1917 au Parlement.

Notions simples et pratiques sur l'Electricité et ses applications, à l'usage des praticiens, par A. Gargam de Moncetz. 1 vol. grand in-8° de 471 pages avec 149 figures. Paris, Desforges, 1920.

Exposer en langage ordinaire, et sans le secours du calcul (ou presque), les notions d'électricité nécessaires aux praticiens non initiés, n'est pas précisément chose facile, surtout si l'on veut éviter l'écueil de certains procédés de vulgarisation trop souvent utilisés en pareil cas. Or, il faut reconnaître que l'auteur s'est tiré tout à son honneur de cette difficulté et que le présent ouvrage répond excellentement à son titre.

Un mode d'exposition clair et correct, une partie historique suffisamment dé-

veloppée, une illustration schématique remarquable, enfin une série de tableaux numériques judicieusement choisis, font de cet ouvrage un guide précieux pour les débutants, et même pour certaines catégories d'industriels et de spécialistes. A signaler, entre autres, le chapitre consacré aux méthodes de mesures et celui relatif à la décharge électrique et à la radiologie.

Des emplois de l'aluminium dans la construction des machines, par R. de Fleury et R. Labruyère, 1 vol., 22 cm × 14 cm, de II-58 pages, avec 32 figures. Paris, Dunod et Pinat, 1919.

Après avoir rappelé, dans leur préface, comment « l'extension du champ d'application de l'aluminium, au cours de la guerre, a donné à ce métal une place inattendue dans la construction mécanique », les auteurs examinent, en quelques chapitres courts mais substantiels, les cas où l'emploi des alliages d'aluminium s'imposera de plus en plus dans l'industrie mécanique, cet emploi ayant pour résultats principaux : d'améliorer le fonctionnement des mécanismes ; d'accroître leurs vitesses de régime, leurs capacités de production, leurs rendements ; enfin, d'abaisser leurs prix d'établissement et d'achat. A citer, entre autres, les chapitres relatifs aux moyens : d'améliorer le rendement et d'abaisser la consommation des moteurs à explosion ; d'éviter les vitesses critiques et résonances dans la construction mécanique ; d'obtenir des machines à marche silencieuse ; d'améliorer la suspension, l'adhérence et la durée des véhicules automobiles ; d'améliorer les machines électriques. L'ouvrage se termine par un aperçu des ressources nationales en aluminium et des applications nouvelles qu'assurera l'abaissement, prévu, de ce métal et de ses alliages.

En résumé : beaucoup de suggestions intéressantes sous un petit nombre de pages.

Espace, temps et gravitation, par A. S. Eddington. Ouvrage traduit de l'anglais par J. Rossignol, avec une introduction de P. Langevin. Paris, Librairie scientifique J. Hermann.

L'ouvrage débute par un prologue présenté sous forme de conversation, entre trois personnages : le Physicien expérimental, le Mathématicien pur, le Relativiste. Rien de plus pénétrant que l'analyse, résultant du choc des opinions de ces trois interlocuteurs, aux habitudes intellectuelles bien différentes, des conceptions qui nous semblèrent si claires autrefois, de l'espace et du temps. On peut dire que l'état d'esprit où nous met ce dialogue est le doute cartésien qui doit être la base des réflexions de tout homme qui pense. Analyser ces conceptions est une œuvre dont heureusement peut se passer la vie courante, et même, pendant bien longtemps encore, la plus grande partie de notre Science ; mais, dès que certaines questions sont posées, il faut s'y attaquer, et bon gré mal gré, elles ne nous laissent plus le doux repos d'autrefois. Aussi, après ce prologue, le lecteur est-il tout préparé à admettre l'hypothèse si paradoxale de la construction de Fitzgerald-Lorentz pour expliquer l'énigmatique expérience Michelson et Morley. Des comparaisons humoristiques, menées jusqu'au bout d'une main sûre, forcent la conviction du lecteur malgré les conséquences extraordinaires auxquelles elles aboutissent : « Gulliver prenait les Lilliputiens pour une race de nains, et les Lilliputiens regardaient Gulliver comme un géant. C'est naturel. Mais si les Lilliputiens avaient semblé des géants à Gulliver et que Gulliver eût paru un nain pour les Lilliputiens. Non ! Voilà qui eut paru trop absurde à notre imagination, et c'est bien là une de ces idées invraisemblables que l'on ne peut trouver que dans les pages entières de la Science ! », et pourtant, cette réciprocité n'est qu'une conséquence du principe de relativité ! On jugera par là du ton général du chapitre. L'auteur aborde alors l'étude de cette relativité ainsi rendue nécessaire : « Longueur et durée ne sont pas des qualités inhérentes au monde extérieur, ce ne sont que des rapports entre les objets de ce monde et quelque observateur bien déterminé ; le Temps est la quatrième dimension de l'espace » ; telles sont les idées fondamentales développées dans ce

chapitre éminemment suggestif. Nous pénétrons alors, au chapitre suivant, dans cet Univers à petite dimension que nous venons d'entrevoir : dans l'espace euclidien, l'intervalle de deux points est simplement leur distance ; dans l'espace à quatre dimensions, l'intervalle est un élément complexe impliquant à la fois l'idée d'espace et l'idée de temps ; en fonction des coordonnées, il a à peu près la même expression que dans la géométrie ordinaire, sauf avec un changement de degré pour le carré de l'intervalle des temps, ce qui conduit — nouvel étonnement — à considérer le temps comme une coordonnée imaginaire de l'espace à quatre dimensions. L'auteur aborde alors l'étude des champs de force et en particulier de la gravitation ; on enseigne que la force centrifuge est une force fictive ; pourquoi n'en serait-il pas de même de la force de gravitation : « Ce n'est qu'au moment où l'observateur est dévié de sa ligne d'Univers propre qu'il a la sensation de se trouver au sein d'un champ de force ». La naissance des forces est donc attachée à la nature même de l'espace. D'où l'étude qui suit des différents genres d'espaces. Ces généralités conduisent l'auteur à comparer la nouvelle loi de gravitation à la loi newtonienne, et alors survient ce nouveau paradoxe : la lumière pesante qui a donné l'une des plus belles confirmations de la théorie par la découverte expérimentale de la déviation des rayons lumineux dans le voisinage du soleil. Ceci nous ramène à la Mécanique de l'Energie et de la quantité de mouvement, qui est examinée dans un chapitre spécial. Dans ce chapitre, l'auteur introduit, outre les notions d'énergie et de quantité de mouvement, la notion plus moderne d'« action », produit d'une masse (ou d'une énergie, puisque dans les théories modernes, ces deux produits sont de même nature) par un temps, et il arrive à la conclusion que l'« action » n'est pas autre chose que la courbure de l'espace à quatre dimensions : C'est là, dit-il, une affirmation à peu près impossible à rendre concrète. Nous n'avons nulle peine à le croire. Enfin, les deux derniers chapitres intitulés, l'un : Vers l'infini ; l'autre : Sur la nature des choses, nous amènent aux plus hautes spéculations métaphysiques.

En résumé, l'intéressant ouvrage de M. Eddington s'adresse aux physiciens, aux mathématiciens, aux philosophes et à tous ceux que le développement de la pensée scientifique ne laisse pas indifférents. Comme le dit M. Langevin dans sa Préface, ce livre est un exposé clair et original « où se trouve représentée, sous son triple aspect, théorique, expérimental et littéraire, la remarquable et féconde activité que M. Eddington, justement enthousiaste, a mise au service de la Théorie d'Einstein, depuis qu'au travers et au-dessus des fumées de la guerre, la nouvelle nous est parvenue des efforts soutenus ces dernières années pour pénétrer le mystère de la gravitation, de celui dont le nom représentera le moment le plus important depuis Copernic et Newton dans le développement de notre compréhension du monde ».

Au physicien l'auteur montre ce que, à l'heure actuelle, il est en droit d'attendre de la théorie de la relativité ; elle n'est applicable qu'aux phénomènes « macroscopiques », à la Physique du continu ; sa liaison avec la théorie des quanta n'est pas encore faite et le « discontinu » lui échappe. Il semble que les lois physiques, dont la théorie d'Einstein donne une forme si condensée, ne sont que des identités nécessaires pour la coordination des concepts primordiaux sur lesquels repose notre perception de l'Univers. Le problème ainsi posé et développé, ne peut manquer d'intéresser le philosophe et le mathématicien. Ce dernier malgré sa répugnance à quitter les sphères d'abstraction dans lesquelles il vit, ne saurait refuser l'invitation qui lui est faite de réfléchir un peu sur la nature physique des axiomes qui sont à la base de ses spéculations. Le philosophe verra encore quelle solution Einstein et de Litter ont été conduits à donner à un autre problème, celui de l'Infini ; à lui d'y ajouter, s'il le veut, force développements métaphysiques, mais l'auteur, prudent, s'est bien gardé de le faire.

L'ouvrage est écrit dans un style pittoresque émaillé d'expressions originales que le traducteur s'est efforcé de respecter dans toute la mesure du possible. La forme est limpide et de nombreuses comparaisons aussi imprévues que merveilleusement bien choisies, contribuent à mettre le sujet à la portée de tous, de sorte qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une éducation scientifique pour sentir la beauté et la grandeur de la Théorie.

Enfin, soucieux de parfaire cet ouvrage, M. Eddington a bien voulu écrire pour l'édition française un complément théorique où il résume l'œuvre mathématique d'Einstein et sa généralisation due à M. Weyl ; la lecture de cet exposé fera comprendre, mieux que tout développement littéraire, la puissance et l'harmonie de l'œuvre géniale du Newton moderne.

L'Electrometallurgie du fer et de ses alliages, par Jean Escard. 1 vol. 25 cm X 16 cm, de IX-811 pages, avec 368 figures Paris, Dunod, 1920.

Relatant, dans son Introduction, les origines de l'industrie à laquelle il va consacrer plus de huit cents pages, l'auteur fait remonter à l'inventeur français Pichon la première tentative de réduction électrothermique des minerais de fer pour l'obtention de ce métal, vers 1854; puis, après avoir mentionné rapidement les divers essais de fours qui se succédèrent pendant un demi-siècle, il passe aux travaux de Slassano, de Gin et Leleux, de Keller, et surtout d'Héroult, qui, de 1898 à 1900, marquèrent la première période industrielle de l'électrometallurgie du fer.

Et c'est par la description du procédé Héroult, pour la production électrothermique de la fonte, que débute l'ouvrage de Jean Escard. Sont ensuite décrits les fours suédois et norvégiens, destinés au même but, le procédé et les fours Keller pour la fabrication des fontes synthétiques, le water-jacket électrique (procédé Sébillot), ce premier chapitre se terminant par l'examen de questions diverses : traitement électrothermique des résidus de grillage des pyrites, des sables noirs ferrugineux, des minerais pulvérulents; calcul du carbone et de l'énergie électrique nécessaires par tonne de fonte; comparaison entre le haut-fourneau et le four électrique.

Le chapitre II, qui traite des aciers électriques, est le plus important de l'ouvrage. Là sont décrits successivement : les fours à arc proprement dits, ceux à résistance, à arc et résistance, à induction; la fabrication directe du fer et de l'acier à partir du minerai; les qualités et l'utilisation des aciers électriques.

Le chapitre III passe en revue toute la série des ferro-alliages industriels : ferro-chrome, ferro-silicium, ferro-manganèse, etc, etc, tandis que le chapitre IV traite des procédés de fabrication, des propriétés et de l'utilisation du fer électrolytique. Les traitements électrothermiques : trempe et soudure, font l'objet du chapitre V. Enfin, le chapitre VI et dernier est consacré au traitement électromagnétique des minerais de fer et des fers métallurgiques, sous les principales rubriques suivantes : séparation et enrichissement des minerais; trieurs de fonderie et de sidérurgie; levage et manutention des fers métallurgiques.

Bien que fort incomplète, cette énumération des sujets traités montre que l'ouvrage de Jean Escard, rassemblé, suivant un ordre parfaitement judicieux, tout ce qu'il est nécessaire de connaître en matière d'électrometallurgie du fer.

Et considérant le soin extrême avec lequel ce volume — après tant d'autres du même auteur — est présenté, tant au point de vue du texte qu'à celui des tableaux numériques et des figures, on ne saurait trop rendre hommage à la mémoire du travailleur intrépide dont la disparition prématurée inspire d'unanimes regrets.

IL Y A TRENTE ANS

Nouveau mode d'emploi des transformateurs à courant continu (M. Rechniewski). Affinage électrolytique du cuivre (M. Hippolyte Fontaine).

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. HENRIOT - 20, RUE GEBERT, PARIS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 1^{er} février 1922 :
Admission de membres titulaires, p. 81. — Prix Rouville, p. 82. — Les communications téléphoniques entre centrales; téléphonie par courants à haute fréquence (M. MARIUS LATOUR), p. 82. — La précipitation électrique des poussières : son application à la purification industrielle des gaz (M. SAGET) p. 83. — Remarques sur la mesure du potentiel le long des chaînes d'isolateurs (M. P. JANET), p. 101. — L'étalonnage des wattmètres en courant alternatifs (travaux du Laboratoire central d'électricité, MM. P. de la GORCE et BAJON), p. 105.

BIBLIOGRAPHIE, p. 112.

IL Y A TRENTE ANS, p. 112.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 1^{er} février 1922. (1)

Présidence de M. JEAN REY

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Bergier de Beauregard (Jean-Louis-Paul-Claude-Marie), Etudiant, 53, avenue de Neuilly, à Neuilly-sur-Seine, (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bernard (Jean-François-Emile), Directeur commercial des Ateliers de Constructions électriques de Delle, 4, villa Hippolyte-Garnier, à Paris, (14^e). — Présenté par MM. Darnal et Goldschmidt.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

- Bickert** (Pierre-Simon), Licencié ès sciences, Elève à l'E. S. E., 3, rue Eugène-Labiche, à Paris, (16*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Callou** (Léon-Charles), Directeur à la Compagnie générale électrique, 155, rue de l'Université, à Paris (8*). — Présenté par MM. Jean Rey et Eschwege.
- Crozet** (Georges), Elève à l'E. S. E., 59 bis, rue Rochechouart, à Paris, (17*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Durelle** (Jacques-René), Elève à l'E. S. E., 4, rue du Printemps, à Paris, (17*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Hémery** (Marcel-Jeon), Elève à l'E. S. E., 104, rue de Vaugirard, à Paris, (15*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Humruzian**, Elève à l'E. S. E., 112, avenue Victor-Hugo, à Paris (16*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Léclerc** (Jacques-Henri-Louis), Ingénieur I. E. G., Elève à l'E. S. E., 3, rue Sextuis-Michel, à Paris, (15*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Malot** (Jacques-Gustave-Auguste), Elève à l'E. S. E., 16, rue Gounod, Paris, (17*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Mouette** (Pierre-Marie), Elève à l'E. S. E., 3, rue Victor-Considérant, à Paris, (14*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Mouillon** (Georges-Jean-Henri), Elève à l'E. S. E., 4, rue Brown-Séquant, à Paris, (15*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Portejoie** (Jean-Gaston-Yves-René), Elève à l'E. S. E., 40, rue d'Ulm, à Paris, (5*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Raemy** (de), Directeur général des Ateliers de Constructions électriques de Delle, 28, boulevard de Strasbourg, à Paris, (10*). — Présenté par MM. Darnal et Goldschmidt.
- Roy** (Fernand-Lucien), Elève à l'E. S. E., 12, rue de la Chaussée-d'Antin, à Paris, (9*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Tisseyre** (Robert-Marie), Lieutenant d'artillerie, 17, rue Saint-Dominique, à Paris, (7*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Vallant** (Pierre-Claude-René), Ingénieur E. C. P., Elève à l'E. S. E., 139, rue de Sèvres, à Paris, (15*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.
- Walch** (Henri), Elève à l'E. S. E., 40, rue Guynemer, à Paris (6*). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT adresse les félicitations de la Société à son président d'honneur, M. Blondel, à qui vient d'être attribué le prix Rouville du Ministère des Travaux publics.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

Communications téléphoniques entre centrales ; téléphonie par courants à haute fréquence, par M. Marius LATOUR.

La communication se rapporte aux perfectionnements importants que l'on peut apporter dans les communications entre les centrales électriques, grâce à l'utilisation des tubes électroniques.

Elle passe en revue les dispositifs à employer soit pour l'utilisation de lignes existantes, soit pour le cas où aucune installation particulière n'existe.

Le texte de cette communication sera donné dans un prochain bulletin.

LA PRÉCIPITATION ÉLECTRIQUE DES POUSSIÈRES

Son application à la purification industrielle des gaz

M. SAGET. — « La précipitation électrique des poussières dérive du phénomène bien connu du déplacement des poussières en suspension dans un gaz, sous l'influence d'un champ électrique.

» Si l'on considère une fine particule sphérique possédant une charge électrique déterminée Q placée dans un champ électrique de valeur H , elle est soumise à une force F parallèle aux lignes de force

$$F = QH.$$

» Sous l'influence de cette force, la particule se déplace et prend une vitesse limitée par la force de frottement due à la viscosité du gaz dans lequel la particule se déplace.

» Cette force peut s'exprimer :

$$f = C v,$$

v étant la vitesse de la particule et C une constante dépendant du rayon de la particule a et du coefficient de viscosité du gaz z .

» La formule approchée de Stokes donne

$$C = 6 \pi a z.$$

» Etant donnée la petitesse des particules envisagées, on peut négliger l'action de la pesanteur et écrire qu'à chaque instant $F = f$, d'où

$$v = \frac{QH}{C}.$$

» Si le gaz tenant en suspension les particules est animé d'un mouvement uniforme de vitesse V , perpendiculaire au champ électrique, la particule sera elle-même entraînée à cette vitesse. Elle prendra donc une direction déterminée par la composition des deux vitesses perpendiculaires v et V et se déplacera obliquement par rapport au champ.

» Les appareils destinés à la précipitation électrique des poussières sont constitués par deux électrodes parallèles chargées à des potentiels différents et créant entre eux un champ électrique. Le

courant gazeux à traiter passe entre des électrodes, perpendiculairement au champ.

» Sous l'influence de ce dernier, les particules en suspension se dirigent d'une électrode vers l'autre et viennent se coller sur les parois.

» Les formules précédentes démontrent que les dimensions transversales et longitudinales de l'appareil de captation dépendent de la vitesse du courant gazeux V , de la valeur du champ électrique H , et de la charge électrique de chaque particule Q , indépendamment des caractéristiques propres au gaz et aux poussières — qui sont variables pour chaque cas envisagé.

» Pour obtenir le rendement maximum, il y aura donc intérêt à augmenter autant que possible le champ H et la charge Q .

» Les particules en suspension dans le gaz isolant reçoivent leur charge électrique par l'intermédiaire de l'ionisation du milieu.

» Dès qu'une particule se trouve à proximité d'un ion, ce dernier est attiré par influence et cède sa charge à la particule, mais alors cette dernière peut rencontrer un ion de signe contraire, s'il en existe, et revenir ainsi à l'état neutre.

» Une ionisation quelconque préalable du milieu provoquerait donc sur les particules, soit des charges contraires, soit même l'absence complète de charge. Il en résulterait que certaines particules seraient précipitées sur une électrode, d'autres sur l'autre électrode, tandis que celles à l'état neutre ne seraient pas influencées par le champ électrique.

» Pour cette raison, l'appareil de captation doit fournir lui-même l'ionisation nécessaire pour charger les particules d'une quantité d'électricité aussi grande que possible et toutes de même signe.

» On obtient aisément ce résultat en utilisant le pouvoir des pointes, chargées à haut potentiel, d'ioniser très rapidement et très fortement l'espace environnant.

» L'une des électrodes de l'appareil de captation pourra donc être constituée par des pointes ou plus simplement par un fil fin tendu rectilignement qui, grâce à son petit rayon de courbure, peut être considéré comme formant une infinité de pointes agissant en toutes directions, perpendiculairement à l'axe.

» L'une des électrodes étant un fil tendu, il devient naturel de

constituer l'autre électrode par un cylindre concentrique au fil pris comme axe.

» C'est ainsi que se présentent la plupart des appareils de précipitation : le courant gazeux entre par une des extrémités de la canalisation que constitue le cylindre, les poussières chargées par ionisation du fil d'une quantité d'électricité de même signe sont soumises à l'action du champ radial qui existe entre le fil et le cylindre et sont précipitées sur ce dernier où elles adhèrent. Le courant gazeux sort du cylindre partiellement ou totalement débarrassé de poussières.

» Le champ électrique d'un tel appareil est radial ; sa valeur est donné par la formule :

$$H = \frac{E}{x} \frac{1}{\text{Log} \frac{R_2}{R_1}},$$

» H étant la valeur du champ à une distance x de l'axe des cylindres ;

» R_1 et R_2 étant les rayons des cylindres intérieurs et extérieurs ;

» et E la différence de potentiel entre les deux cylindres.

» Ainsi qu'il est facile de s'en rendre compte, en utilisant un fil très fin et un cylindre de grand diamètre, le champ est très élevé dans le voisinage du fil — pour décroître très rapidement à mesure qu'on se rapproche du cylindre externe. Au contraire, lorsque le rapport des rayons des deux cylindres $\frac{R_2}{R_1}$ tend vers l'unité, le champ devient plus uniforme.

» On aurait donc avantage à construire les appareils sur ce principe, s'il n'était nécessaire, ainsi qu'il a été dit précédemment, d'obtenir une ionisation intense grâce à l'effet corona produit par un fil porté à potentiel élevé.

» En fait, toute l'énergie électrique fournie à l'appareil est utilisée à produire cet effet corona, source d'ionisation.

» Les ions ainsi créés se portent sur les particules voisines en leur cédant leurs charges jusqu'à ce qu'elles soient en équilibre électrique.

» Les particules chargées sont soumises à la force du champ électrique et sont précipitées sur le cylindre externe. S'il n'existe

pas de particule, les fils formés se dirigent avec leur vitesse propre vers l'électrode extérieure, sur laquelle ils abandonnent leur charge.

» Par conséquent, le débit électrique d'un appareil est pratiquement indépendant de la quantité de poussières captées, ce que confirme l'expérience.

» La formule donnant la valeur du champ H démontre que celui-ci est proportionnel au potentiel E . Il est donc avantageux d'augmenter ce dernier autant que possible. On est limité dans cette voie par le jaillissement d'étincelles ou d'arcs entre les électrodes. L'utilisation de la propriété bien connue du système pointe plateau permet d'employer une différence de potentiel plus élevée, sans éclatement, lorsque le fil est négatif par rapport au cylindre.

» Les extrémités du cylindre constituent des arêtes vives où la pression électrique est plus élevée. Il en résulte à cet endroit un champ électrique plus intense provoquant une précipitation plus active, mais aussi une tendance à l'amorçage en ce point particulier.

» On peut l'éviter, soit en évasant les extrémités du cylindre vers l'extérieur pour augmenter progressivement la distance des deux électrodes, soit en augmentant beaucoup le diamètre du fil au niveau des extrémités, pour obtenir un champ électrique plus uniforme. Enfin, l'interposition de lames isolantes permet d'augmenter la rigidité électrique de ces points particuliers.

» Dans le cas où les nécessités de la pratique obligeraient à l'emploi de fils d'un diamètre trop grand pour produire une ionisation suffisante avec le potentiel employé, on peut recouvrir ces fils d'une garniture présentant de nombreuses pointes (par exemple : des fibres d'amiante), ou mieux encore donner à ces tiges une section présentant des arêtes vives (par exemple : une section triangle curviligne concave).

» En général, un appareil industriel est constitué par une série de tubes disposés verticalement — leur nombre peut atteindre plusieurs centaines pour les installations à gros débit de gaz —, leur hauteur 4 à 5 mètres, avec un diamètre de 20 à 40 centimètres.

» Les gaz à épurer arrivent à la partie inférieure et ressortent débarrassés de poussières à la partie supérieure. Selon qu'il convient ou non de les récupérer, l'appareil débouche à ciel ouvert

ou dans une chambre étanche possédant une canalisation de départ.

» Les cylindres sont généralement métalliques et reliés au sol. Les fils axiaux fixés sur un cadre rigide sont tendus par des contrepoids pendant librement dans la chambre inférieure d'arrivée des gaz.

» Ces derniers sont reliés entre eux de façon à éviter des mouvements pendulaires qui provoqueraient un décentrement.

» Le cadre supérieur est supporté par des isolateurs convenablement disposés pour éviter qu'ils ne soient recouverts par des poussières ou des gouttelettes de condensation en suspension dans les gaz, ce qui pourrait provoquer des défauts d'isolement et des courts-circuits avec la terre.

» Un dispositif ingénieux consiste à placer chaque isolateur dans une sorte de chambre entièrement close reliée à la chambre des gaz par une tubulure concentrique au support du cadre. Cette tubulure constitue un petit cylindre de captation qui purifie facilement la faible quantité de gaz qui pourrait parvenir à la chambre de l'isolateur. Ce dernier se trouvant ainsi dans un milieu privé de toute particule, conserve indéfiniment des surfaces propres garantissant un parfait isolement.

» La figure 1 représente une vue schématique d'une installation industrielle.

» Dans certains cas particuliers où l'on ne peut utiliser les cylindres, l'appareil de captation est constitué par une chambre rectangulaire portant alternativement des séries de plaques et de fils isolés parallèles. Les gaz traversent l'ensemble perpendiculairement aux fils tendus et parallèlement aux plaques.

» Dans la généralité des industries, la quantité de poussières est relativement petite par rapport au volume des gaz traités. Ces poussières se déposent donc sous forme d'une couche demi-adhérente au cylindre. Trois ou quatre fois par jour, un dispositif de frappe les fait tomber dans des trémies disposées à la partie inférieure de l'appareil.

» Comme l'a démontré M. Le Brasseur, les particules plus ou moins agglomérées peuvent retomber le long des parois sans être reprises par le courant gazeux ascendant, grâce à la vitesse sensiblement nulle de ce dernier au voisinage immédiat de la surface du cylindre.

» Lorsque la quantité de poussières est considérable, on assure une récupération continue en perforant les cylindres, les poussières sortent par ces orifices et sont recueillies dans une double enveloppe.

» Quel que soit l'appareil, il doit être alimenté par un courant à haute tension. La nécessité d'un champ toujours du même sens rend indispensable l'emploi du courant continu ou tout au moins unidirectionnel.

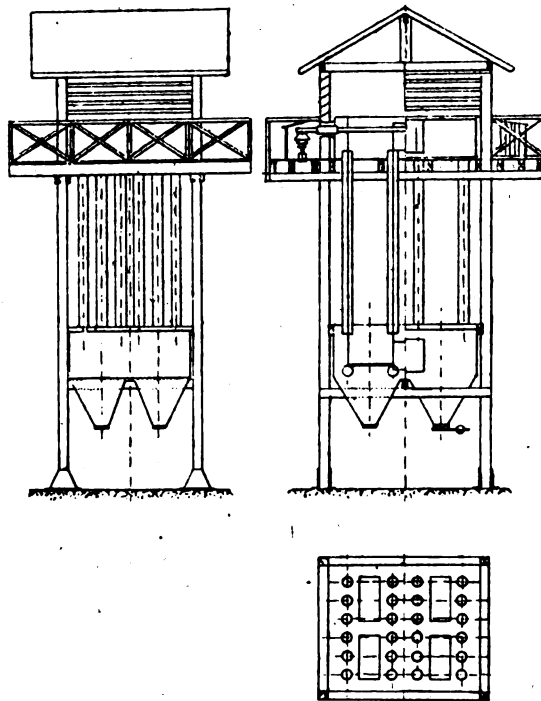


Fig. 1. — Epurateur électrique pour poussières métallurgiques.

» Ainsi que nous l'avons vu précédemment, le pôle positif est connecté à la terre tandis que le pôle négatif est relié au système de fils isolés.

» La différence de potentiel est de 50 000 volts ; elle peut atteindre dans certains installations 100 000 volts, le débit est relativement faible, environ 0,1 ampère pour une installation de moyenne importance.

» Une source fournissant un courant continu serait la solution idéale au point de vue rendement. Malheureusement, on ne peut envisager ni la machine statique qui n'est pas encore parvenue

à une forme et à un rendement industriels, ni la dynamo à courant continu que l'on n'a pas encore réalisée pour produire directement de telles tensions, ni même une batterie d'accumulateurs qui serait encombrante et d'isolement difficile.

» La seule solution pratique consiste à utiliser un courant alternatif, dont on élève très facilement la tension à l'aide de transformateurs. Le courant haute tension ainsi obtenu est redressé, soit à l'aide de commutateurs tournants synchrones, soit à l'aide de soupapes à gaz ou à émission thermoionique.

» Le courant redressé est constitué par les deux alternances du courant alternatif séparées par un intervalle de repos plus ou moins long. Par suite, le potentiel et le champ électrique sont continuellement variables. Dans les cas spéciaux où la baisse de rendement qui en résulte serait préjudiciable, on peut connecter un condensateur aux bornes de l'appareil d'utilisation. Celui-ci constitue un réservoir d'énergie qui se charge pendant les maxima de potentiel, pour restituer son énergie pendant les temps de repos ou de potentiels faibles. On peut obtenir de cette façon, par un choix judicieux de la capacité, une tension relativement constante aux bornes de l'appareil de précipitation.

» Les transformateurs élévateurs de tension ne présentent aucune particularité digne d'être mentionnée, sinon qu'ils doivent pouvoir résister à des ondes de fréquence élevée provenant des étincelles qui se produisent dans les appareils. Ils sont établis de manière à ce que leurs pôles haute tension puissent être mis alternativement au sol.

» Les redresseurs sont généralement constitués par un axe horizontal placé en bout d'arbre d'un moteur synchrone tétrapolaire. Sur cet axe sont calés perpendiculairement deux bras métalliques ou deux aiguilles d'acier calés à 90° l'un de l'autre.

» L'un de ces deux bras est monté sur un manchon isolant et est solidaire d'une bague sur laquelle frotte un balai porté par un isolateur : c'est le pôle négatif haute tension. L'autre bras est directement fixé sur l'arbre sur lequel frottent des balais. C'est le pôle positif en connection avec le sol.

» Vis-à-vis des bras, se trouvent deux paires de secteurs isolés calés à 90°, reliés aux bornes haute tension du transformateur. L'intervalle séparant les secteurs des extrémités des bras mobiles est de 1 à 2 millimètres, espace facilement franchissable par

de petites étincelles ou arcs, lorsque le redresseur tourne et est alimenté par la haute tension.

» Il est facile de comprendre le mécanisme du redressement du courant, A chaque alternance, correspond une rotation de 90° , de sorte qu'à chaque changement de sens de courant, chaque bras transversal vient, en quelque sorte, cueillir le courant de polarité convenable sur le secteur correspondant.

» Pour faciliter la mise en phase du redresseur avec le courant alternatif, le stator du moteur synchrone est monté sur un berceau qui permet de le déplacer angulairement par rapport à l'ensemble du redresseur.

» La figure 2 représente un redresseur établi par la Société de Purification industrielle des Gaz, on y reconnaît facilement les divers éléments précédemment décrits.

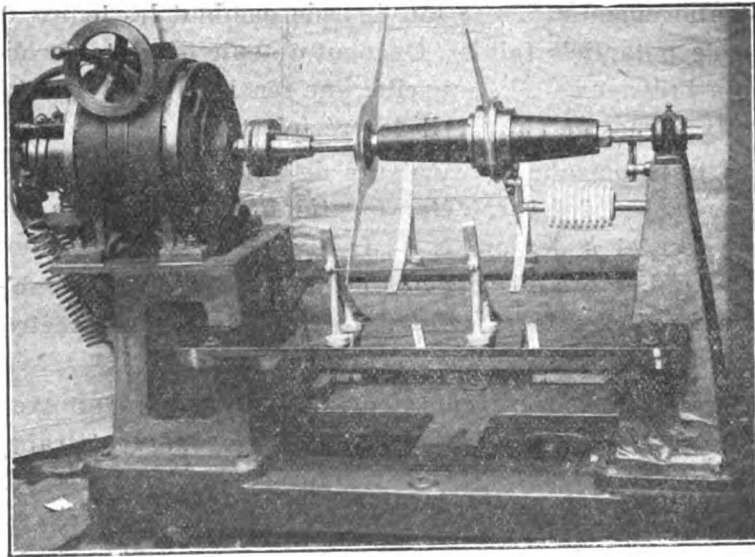


Fig. 2. — Redresseur de 7,5 kilovolts-ampères.

» Un tel redresseur peut fonctionner en service continu à 0,150 ampère pour une tension de 50 000 volts efficaces, ce qui correspond à 7,5 kilovolts-ampères utilisables.

» Dans d'autres systèmes, les bras et les secteurs sont disposés dans un même plan.

» La figure 3 représente un redresseur de la même société, accompagné de son tableau de commande, de son rhéostat de réglage et de son transformateur.

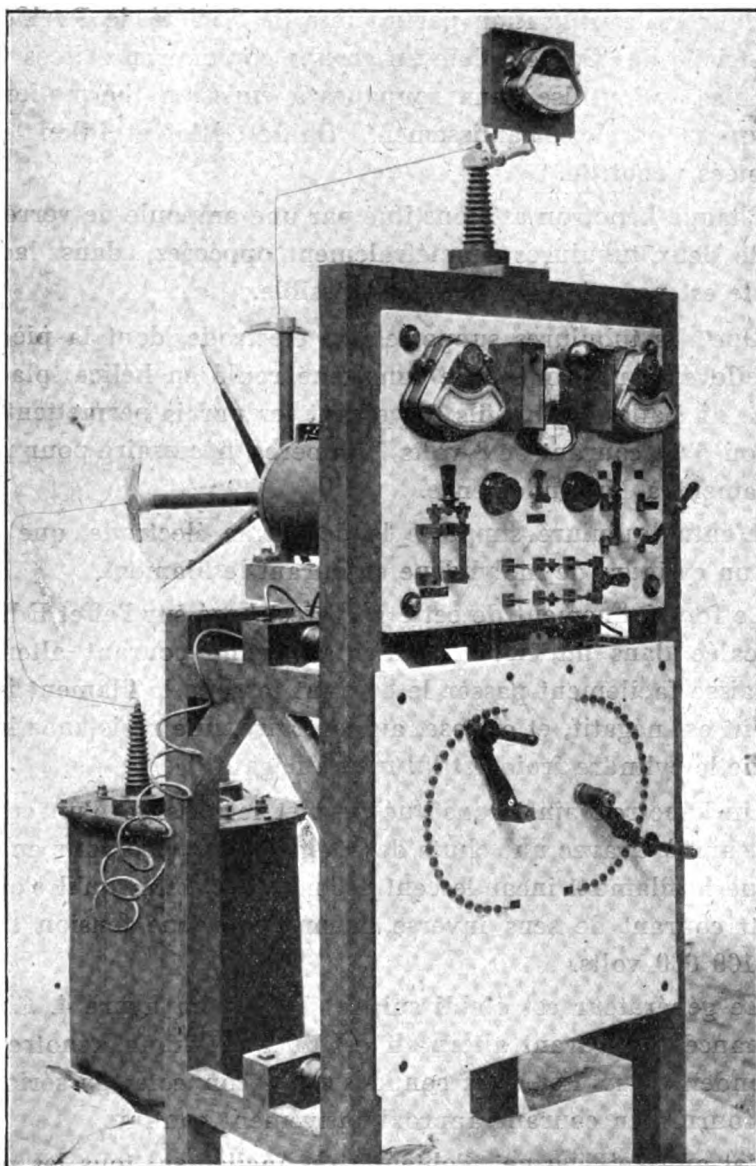


Fig. 3. — Groupe redresseur pour essais.

» L'ensemble constitue un petit groupe facilement amovible, utilisé pour des essais à faire en usine.

» Dans la pratique, en effet, on est toujours amené à effectuer un essai préalable, destiné à déterminer les conditions optima de précipitation, d'où l'on déduit les dimensions des appareils et la puissance du groupe générateur.

» Pour cette utilisation particulière, la Société de Purification industrielle des Gaz emploie un groupe contenu en caisses transportables, qui utilise deux soupapes à émission thermo-ionique, fabriquées par les Etablissements Gaiffe-Gallot et Pilon, et dénommées kénotron.

» Chaque kénotron est constitué par une ampoule de verre, munie de deux tubulures diamétralement opposées, dans laquelle le vide est poussé aussi loin que possible.

» Une des tubulures supporte une électrode, dont la pièce essentielle est un filament de tungstène roulé en hélice, placé au centre du ballon. Deux fils traversant les parois permettent l'adduction d'un courant de 8 volts 7 ampères, nécessaire pour porter le filament à l'incandescence.

» L'autre tubulure supporte la deuxième électrode, que constitue un cylindre de molybdène entourant le filament.

» Le fonctionnement de cette valve est basé sur l'effet Edison : Intercalée dans un circuit alimenté par un courant alternatif, elle laisse facilement passer le courant lorsque le filament incandescent est négatif, et oppose, au contraire, une résistance infinie lorsque le cylindre froid est lui-même négatif.

» Un kénotron ainsi constitué permet le passage d'un courant de 0,1 ampère, avec une chute de potentiel de 1 000 volts environ, lorsque le filament incandescent est négatif, tandis qu'il s'oppose à tout courant de sens inverse, même pour une tension dépassant 100 000 volts.

» Le générateur est établi suivant le schéma figure 4. Chaque alternance du courant alternatif est dirigée par un kénotron sur un condensateur. Les deux condensateurs connectés en série peuvent fournir un courant approximativement continu.

» Cet appareil permet d'obtenir très facilement tous les potentiels jusqu'à 70 000 volts pour une intensité de 0,01 ampère, largement suffisante pour les essais à effectuer.

» On pourrait évidemment constituer des générateurs de puissance notable utilisant des kénotrons comme redresseurs, mais

leur fragilité, leur prix assez élevé, leur remplacement assez fréquent, même si l'on envisage des durées de plus de 1 000 heures (ce qui correspond à 42 jours de travail) en prohibant l'emploi pour des installations industrielles, qui doivent réunir la robustesse, la facilité de fonctionnement et l'économie d'entretien.

» Les premières applications industrielles de la précipitation électrique des poussières remontent à 1885, à la suite d'expérien-

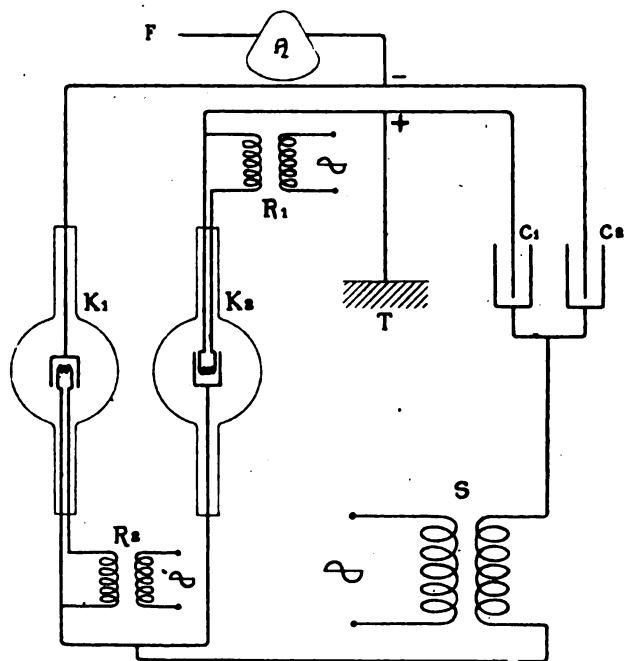


Fig. 4. — Schéma des connexions : S, transformateur élévateur de tension ; K₁, K₂, kénotrons ; R₁, R₂, transformateurs abaisseurs de tension pour alimentation des filaments cathodiques des kénotrons ; C₁, C₂, condensateurs haute tension ; A, ampèremètre ; F, alimentation des électrodes négatives isolées de l'appareil de précipitation électrique ; T, point de circuit connecté avec le sol.

ces de Sir Oliver Lodge. A cette époque, une raffinerie de plomb, la Maison Walker Parker et C^o, en Angleterre, installa un appareil constitué par un système de pointes métalliques placées dans le carneau de tirage des fours à plomb ; le courant électrique étant fourni par des machines à influence Wimshurst, les résultats obtenus furent démonstratifs, mais la machine statique employée ne permit pas une exploitation suivie.

» Sir Oliver Lodge continua les recherches, et breveta, en 1903, un redresseur à vapeur de mercure destiné à l'obtention d'un

courant redressé haute tension en vue de la captation des poussières.

» En 1908, les Américains reprennent sérieusement la question au point de vue industriel.

» Dès lors, en Amérique et en Allemagne, de nombreux brevets furent pris sur cette question, et une puissante société américaine exploite activement ce procédé de purification, qui est universellement répandu sous le nom de Cottrell.

» En France, depuis quelques années déjà, une société indépendante a été créée, sous le nom de Société de Purification industrielle des Gaz. Elle a construit la plupart des installations dont la description va suivre.

» Une des premières applications réalisées en France, a été faite à la Poudrerie d'Angoulême, pendant la guerre, en 1917, pour capter les fumées chargées d'acide sulfurique.

» Les appareils de concentration de l'acide sulfurique envoient dans l'atmosphère des fumées contenant de 4 à 10 grammes de $\text{SO}_4 \text{ H}_2$ par mètre cube. Cet acide est à l'état de vésicules extrêmement fines qui échappent aux moyens habituels de précipitation.

» Outre la perte sensible qui en résulte, il y a une question d'hygiène beaucoup plus importante. Cette pluie d'acide sulfurique se répand dans un périmètre très grand tout autour de la cheminée d'évacuation, dévaste toute la contrée environnante et la rend inhabitable.

» La figure 5 montre la réalisation d'un appareil de précipitation électrique exécuté dans ce but. On y voit le faisceau tubulaire constitué par une série de tubes cylindriques en plomb de 5 mètres de longueur et de 30 centimètres de diamètre. Les électrodes centrales sont constituées par des tiges de plomb durci à profil triangulaire tendues par des contrepoids. L'arrivée des gaz se fait par la chambre inférieure, les gaz purifiés sortant à la partie supérieure. Les vésicules d'acide sulfurique sont précipitées sur les parois, le long desquelles elles ruissellent jusqu'à la partie inférieure où elles sont recueillies par des tuyauteries appropriées.

» Pratiquement, un courant gazeux de 3,5 mètres cubes par seconde est débarrassé de 90 pour 100 des vésicules acides, avec une dépense de l'ordre de 4 kilowatts. Le courant redressé à

50 000 volts est fourni par le générateur installé dans la cabine placée au bas de l'appareil.

» Une autre application du procédé est réalisée dans une usine de broyage de talc. Les nombreux appareils de pulvérisation em-

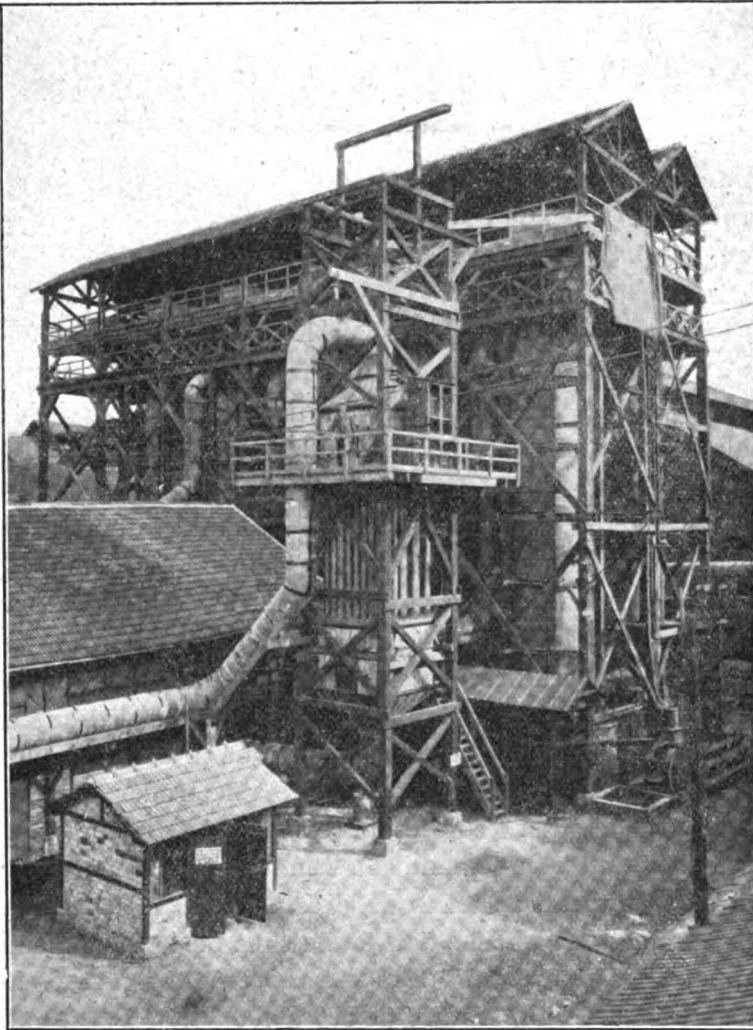


Fig. 5. — Appareil industriel de récupération de l'acide sulfurique.

ployés sont tous en légère dépression sous l'action de l'appel d'air d'un ventilateur général, grâce auquel on évite que la poussière se répande dans les ateliers.

» L'appareil électrique est utilisé pour précipiter le talc en suspension avant de renvoyer l'air dans l'atmosphère.

» Il est constitué par une série de cylindres verticaux en tôle de fer de 20 cm de diamètre. Un système de frappe permet de faire tomber périodiquement la poussière de talc déposée sur les parois.

» On recueille ainsi 800 kg de talc de la qualité la plus fine par 24 heures. Indépendamment du bénéfice ainsi réalisé, la contrée se trouve débarrassée d'une pluie continuelle de poussière fine qui, à la longue, n'était pas sans inconvénient, tant au point de vue de l'hygiène que des cultures.

» Une autre application du même genre a été faite pour la récupération du phosphate de chaux pulvérisé très finement, en vue de l'augmentation de son rendement en agriculture.

» Dans le même ordre d'idées, une application est actuellement en cours d'essais pour capter les poussières provenant des fours à carbure de calcium.

» Il se produit, en effet, dans ces usines, une poussière considérable qui provoque les réclamations justifiées de la population environnante.

» Dans d'autres industries, il peut être intéressant de purifier les gaz en vue de leur utilisation ultérieure. Tel est le cas de la fixation de l'azote atmosphérique dans la fabrication du peroxyde d'azote par l'arc électrique. Après avoir subi l'action de l'arc, les gaz à haute température passent dans un échangeur destiné à les amener au point de liquéfaction de AzO^2 . Or, la pratique a montré que ces gaz étaient chargés d'une quantité infime de poussières d'oxyde de cuivre provenant des électrodes de l'arc. Ces poussières se déposent sur les parois de l'échangeur de température, abaissant rapidement son rendement. Là encore, l'utilisation d'un faisceau de tubes de précipitation, mis sur le circuit des gaz, amena une purification totale sans perte de chaleur. C'est cet appareil à quatre tubes qui est représenté figure 6. Les gaz sont traités à une température de 300 à 400° C.

» Il existe de nombreux exemples de cas où l'industrie a besoin de débarrasser des gaz à température élevée, des poussières qu'ils contiennent. Ici, on peut encore citer l'industrie de la fabrication de l'acide sulfurique.

» Les pyrites sont grillées dans des fours mécaniques produisant une grande quantité de poussières (composées en majeure partie d'oxyde de fer) qui passent avec les gaz, dont une partie

se dépose dans les chambres de plomb et les canalisations sous forme de boues encombrantes, tandis que les particules plus fines restent en suspension dans l'acide qu'elles salissent.

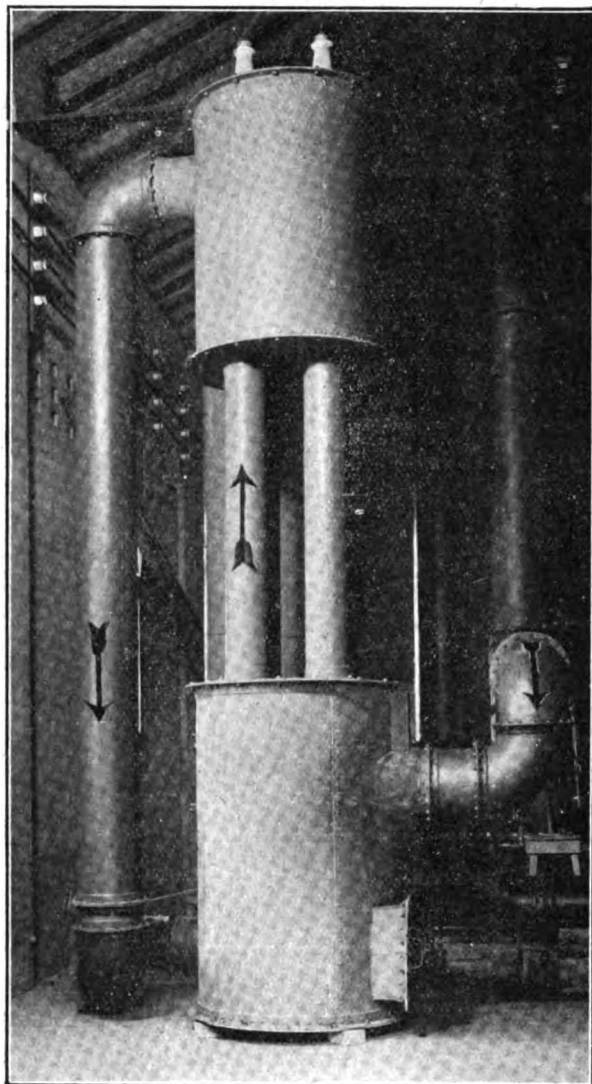


Fig. 6. — Appareil pour purifier les gaz.

» L'appareil de purification établi pour ce cas particulier, est constitué par une chambre rectangulaire divisée en couloirs parallèles par des plaques de tôle. Les électrodes négatives sont constituées par des fils tendus verticalement et parallèlement au milieu de ces couloirs.

» La quantité de poussières enlevées est de 300 kg par 24 heures, pour un volume de gaz traité de 0,6 mètre cube par seconde à 500° C..

» Un frappage intermittent assurait là encore la récupération des poussières déposées.

» Des études très sérieuses se poursuivent actuellement sur la purification des gaz provenant des hauts-fourneaux, en vue de leur utilisation, soit dans les récupérateurs, soit même dans les moteurs à gaz pauvre. On obtient pratiquement une épuration pouvant atteindre 95 pour 100, le gaz brut contenant 2,7 grammes de poussières au mètre cube.

» Aux Etats-Unis, des hauts-fourneaux ont été récemment équipés par ce procédé.

» Les industries du plomb, de l'étain, produisent en quantité considérable des vapeurs d'oxyde difficilement condensables. La précipitation électrique est là encore utilisée avec plein succès et assure une récupération facile avec un prix de revient minime. Les appareils sont toujours établis d'une manière analogue, les variantes étant plutôt imposées par les conditions locales particulières.

» Les Américains, toujours enclins à appliquer sur une grande échelle les procédés économiques, n'ont pas hésité à faire des installations grandioses basées sur ce principe de purification.

» L'International Smelting Co a installé dans une usine, à Toocle, un appareil destiné à recueillir les poussières de cuivre et de plomb provenant des fours Mac Dougal. On a remarqué dans le fonctionnement de cette installation une sélection des poussières ; les premiers appareils recueillant les matières riches en cuivre, tandis que les derniers contiennent les matières riches en plomb.

» La puissance électrique est de 12 kilovolts-ampères pour une récupération atteignant 8 à 9 tonnes par 24 heures.

» L'usine de Garfield (Utah) récupère des poussières plombières provenant du grillage des pyrites de cuivre. L'appareil est constitué par 7 unités de 360 tubes de 127 mm de diamètre, alimentés à 30 000 volts.

» La consommation est de 50 kilowatts. Le débit des gaz de 90 mètres cubes par seconde.

» La fonderie de cuivre de Balaklala, à Coram (E. U.), récu-

père les poussières provenant du grillage de pyrites cuivreuses : 250 mètres cubes par seconde traités à 30 000 volts, avec une consommation de 120 kilowatts.

» Enfin, quelques fonderies du Japon utilisent aussi les installations modernes de précipitation électrique.

» Pour terminer cette liste sommaire des nombreuses installations industrielles, il convient de mentionner l'application originale faite par la Milk Flour Company à la production du lait, des œufs, du jus de raisin réduits en poudre. Ces substances sont pulvérisées par des procédés appropriés dans un courant d'air qui les dessèche. La poudre extrêmement fine qui est obtenue, est séparée par un appareil de précipitation électrique avant que le refroidissement ne produise la condensation de la vapeur d'eau.

» Dans le domaine de l'hygiène, les applications de ce mode de purification sont innombrables. On peut citer, notamment, la précipitation des fumées des cheminées d'usine, et la captation des bactéries contenues dans l'air. Sur ce dernier point, les expériences exécutées au Collège de France ont permis de constater la captation des poussières et la destruction des bactéries ensemencées. Ces expériences ont fait l'objet d'une note à l'Académie des Sciences par M. le Professeur d'Arsonval et par MM. Bordas et Touplain.

» En résumé, on peut affirmer que la précipitation électrique des poussières est un procédé actuellement exploitable dans le domaine de l'industrie.

» Il serait souhaitable de rencontrer chez les industriels français plus de confiance pour l'adoption d'un procédé qui peut sérieusement influencer sur les conditions économiques de la production. Il n'existe pas, en effet, à l'heure actuelle, de moyen plus simple et plus économique pour la captation des poussières solides ou des vésicules liquides. Dans tous les exemples cités précédemment, l'appareil de précipitation électrique a souvent remplacé avantageusement un filtre déjà existant, quand il n'a pas permis la solution d'un problème impossible à réaliser autrement.

» Que les gaz soient froids ou chauds, toxiques ou corrosifs, que la quantité de poussières soit infime ou considérable, que la grosseur des particules atteigne la plus extrême finesse, et, toujours l'appareil de captation électrique est applicable avec succès.

Il réalise à la fois le minimum de dépenses et le minimum d'entretien. Dans beaucoup de cas, la valeur des produits récupérés est considérable, par rapport au prix même de l'installation.

» Les exemples cités ne donnent qu'une faible idée de la variété des applications possibles. Chacun, dans son domaine, peut trouver une application avantageuse de ce merveilleux procédé de purification industrielle des gaz. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Saget.

REMARQUES SUR LA MESURE DES POTENTIELS LE LONG DES CHAINES

D'ISOLATEURS

M. P. JANET. — « A propos de la très intéressante communication de M. Védovelli, je désirerais signaler que, dès 1920, le Laboratoire central d'Electricité a employé une méthode qui paraît plus précise que la méthode de M. Ryan, citée par M. Védovelli, et d'un emploi presque aussi facile.

» Cette méthode, qui vous a été décrite ici même, en novembre 1920, par MM. Dachary et P. de la Gorce, est une méthode d'équilibre.

» On établit (fig. 1), en dérivation entre la ligne et la terre, deux

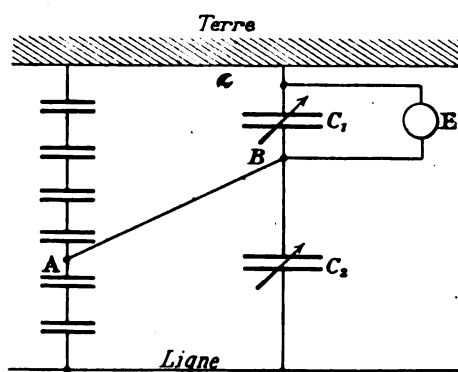


Fig. 1. — Schéma de montage.

condensateurs à capacités variables en série. Soient C_1 et C_2 , ces deux capacités, V la tension totale, U_1 et U_2 les tensions individuelles. On a, comme on le sait :

$$U_1 = V \frac{C_2}{C_1 + C_2}.$$

» Cette tension U_1 est mesurée par un électromètre E, placé aux bornes de C_1 . Cela posé, réunissons par un fil long et fin le point A au point B : il est clair que si le potentiel de ces deux points est le même, l'équilibre ne sera pas troublé et l'électromètre donnera la tension cherchée entre le maillon considéré et la terre. On peut toujours y arriver par un réglage convenable des capacités C_1 et C_2 .

» On peut objecter que les condensateurs à capacités variables

pour hautes tensions sont des appareils peu courants. Je rappellerai seulement, pour répondre à cette objection, que M. de la Gorce a pu les réaliser très facilement à l'aide de tubes concentriques en bakélite garnis de papier d'étain sur leurs faces en regard, le tube intérieur étant suspendu par des cordons isolants et une poulie fixée au plafond, et pouvant ainsi être manœuvré sans danger.

» J'ajouterai que M. de la Gorce étudie actuellement d'autres dispositions pour ces mêmes appareils.

» La grande difficulté de ces mesures provient de la capacité propre des fils de jonctions qui, si fins soient-ils, peuvent ne pas avoir une capacité négligeable par rapport aux capacités très faibles qu'il s'agit de mesurer. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. P. Janet.

La séance est levée à 23 heures.

L'ÉTALONNEMENT DES WATTMÈTRES EN COURANT ALTERNATIF

(Travaux du Laboratoire central d'Electricité)

P. DE LA GORCE et A. BAJON. — « De toutes les mesures qui concernent les courants alternatifs, la plus importante au point de vue pratique est la mesure de la puissance, puisque c'est d'elle que dépend la vérification des compteurs d'énergie, la connaissance du rendement des machines, la détermination des pertes dans les tôles, etc. Pour la réaliser, le seul type d'appareil utilisé usuellement est le *wattmètre électrodynamique*. Les efforts des constructeurs en ont fait un instrument très commode et suffisamment précis pour la plupart des cas. Cependant, il présente diverses causes d'erreurs, dont l'importance relative croît avec le déphasage, et qu'il est difficile d'évaluer ou de corriger à priori, en raison de leur complexité. De là l'intérêt d'une méthode aussi sensible que possible, et qui permette des vérifications exactes dans les conditions d'emploi les plus défavorables.

» Longtemps, on s'est borné à étalonner les wattmètres en courant continu moyennant la seule précaution élémentaire d'inverser pour chaque point les connexions des deux circuits afin d'éliminer l'influence du champ terrestre (ou des champs magnétiques extérieurs). Ce procédé prête à de nombreuses critiques. Les wattmètres servent d'ordinaire en courant alternatif et leur fonctionnement peut être alors sensiblement différent de ce qu'on observe en courant continu. Parmi les actions perturbatrices qui interviennent en courant alternatif, il en est une, la self-induction du circuit dérivé, dont on peut tenir compte par une formule simple et bien connue ; mais d'autres (tels les courants de Foucault dans les masses métalliques des circuits ou l'influence des formes de courbes) sont à peu près inaccessibles au calcul.

» On s'est donc efforcé de trouver des dispositifs permettant la vérification des wattmètres en courant alternatif. Au Laboratoire central d'Electricité, nous avons étudié deux méthodes différentes : la première, appelée *méthode du wattmètre électrostatique*, a été déjà souvent décrite et discutée (¹). Nous désignerons la se-

(¹) Voir notamment l'étude approfondie de MM. C.-C. PATERSON, E.-R. RAYNER et A. KINNES, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1913, t. LI, p. 294-354.

conde sous le nom de *méthode de l'électrodynamomètre différentiel*. Le principe en a été indiqué par Potier dans une note datée de 1902 ⁽¹⁾ ; mais nous l'avons appliqué dans des conditions différentes de celles qu'avait suggérées l'illustre physicien.

I. — MÉTHODE DU WATTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE

» *Principe et formules.* — Cette méthode est fondée sur l'emploi de l'électromètre à quadrants. Le montage est représenté schématiquement sur la figure 1. V_A , V_B , V_C étant les potentiels de

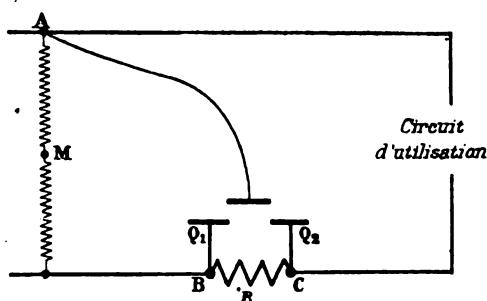


Fig. 1.

l'aiguille et de chacune des paires de quadrants, R une résistance *non inductive* en série avec le circuit d'utilisation, la déviation lue a pour expression ⁽²⁾ :

$$\alpha = k \left(V_A - \frac{V_B + V_C}{2} \right) (V_B - V_C),$$

ou en remarquant que la tension U aux bornes du circuit d'utilisation est égale à $V_A - V_C$ et que $V_B - V_C = RI$:

$$\alpha = k R \left(UI - \frac{RI^2}{2} \right),$$

d'où, pour l'expression de la puissance :

$$P = \frac{\alpha}{kR} + \frac{1}{2} RI^2, \quad (1)$$

⁽¹⁾ A. POTIER, Mémoires sur l'Electricité et l'Optique, p. 90-93.

⁽²⁾ Nous admettons dans ce qui suit les formules simplifiées que l'on utilise couramment pour l'emploi de l'électromètre à quadrants en courant alternatif, mais qui ne sont rigoureusement applicables qu'en première approximation. La théorie complète de l'appareil conduit à des équations beaucoup plus compliquées. (Voir M. MOULIN, *Le Radium*, 1907, p. 145-154 et 188-194). Nous nous réservons de préciser dans une communication ultérieure l'influence des divers termes que nous négligeons ici.

» Le terme correctif $\frac{1}{2} RI^2$ est souvent négligeable ; en tous cas, on peut l'éliminer en connectant l'aiguille, non plus au point A, mais en un point M, tel que le potentiel en M, $V_M = \frac{V_A + V_B}{2}$.

» L'étalonnement des wattmètres a lieu généralement sous charge fictive ; et le montage le plus commode est alors celui de la figure 2. Le point T étant choisi au milieu de la résistance B C,

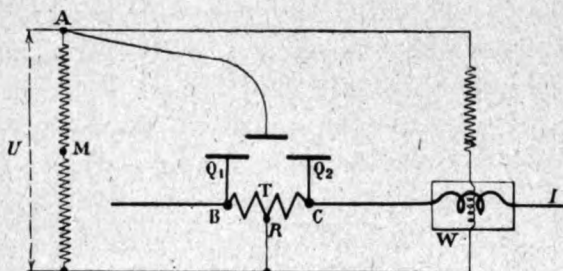


Fig. 2.

on n'a pas à tenir compte de la puissance dépensée dans cette résistance et la formule (1) s'écrit simplement :

$$P = \frac{\alpha}{k R}.$$

» Si la tension appliquée à l'aiguille est trop élevée, on peut la fractionner à l'aide d'un réducteur. L'aiguille étant alors connectée en M, l'expression prend la forme :

$$P = \frac{r_1}{r} \frac{\alpha}{k R}.$$

» *Etalonnement.* — Il reste à déterminer avec la plus grande exactitude possible, la constante k . Cette détermination peut s'effectuer par une mesure en courant alternatif ; on évite ainsi diverses corrections inhérentes à l'emploi de l'électromètre à quadrants en courant continu. On constitue un circuit exclusivement formé de résistances non inductives, soit ρ leur valeur (fig. 3). La puissance dépensée :

$$P = \frac{\alpha}{k R} = \frac{U^2}{\rho},$$

d'où :

$$k = \frac{\alpha \rho}{U^2 R}.$$

» Si on fait varier soit ρ , soit R , il est facile de tracer la courbe de k en fonction de α . Cette courbe peut différer légèrement d'une droite.

» En définitive, si on suppose connues les résistances qui entrent dans les équations ci-dessus, la mesure de la puissance se ramène à la mesure de la tension U . Celle-ci intervenant par son carré devra être déterminée avec une grande précision, puisqu'une erreur sur U entraîne une erreur double sur la puissance. On y parvient grâce à l'emploi de voltmètres électrostatiques à miroir, dont la déviation obéit à la loi $D = a U^2$ et qui, par suite, présentent une grande sensibilité dans le haut de l'échelle. On choisit le calibre de l'instrument (où on fractionne la tension à mesurer à l'aide de résistances montées en potentiomètre), de ma-

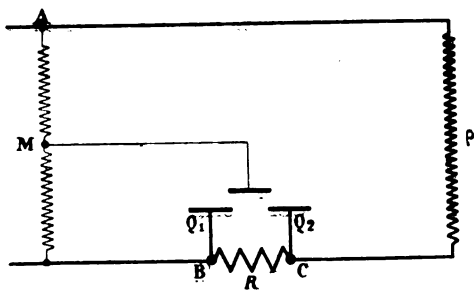


Fig. 3.

nière à se trouver toujours dans la région de sensibilité maximum. Naturellement, l'appareil doit être étalonné en courant continu. Nous utilisons pour nos expériences un voltmètre électrostatique (électromètre d'Ayrton et Matter) de sensibilité telle qu'à 25 volts, une variation de 1 volt correspondait à 20 millimètres de déviation. Si on admet qu'on peut apprécier le quart de millimètre, ce qui n'a rien d'excessif, la sensibilité sur les lectures atteindrait le demi-millième.

» *Avantages de la méthode et causes d'erreurs.* — L'emploi du wattmètre électrostatique présente des avantages importants. D'une application théoriquement irréprochable, dans les limites où sont valables les formules simples dont nous sommes partis, il se prête à l'étalonnage des wattmètres de tous calibres, par un simple changement de la résistance BC . Remarquons, toutefois, que la réalisation des résistances capables de supporter de gros courants et rigoureusement non inductives, rencontre d'assez graves diffi-

cultés. D'autre part, dans le maniement des hautes intensités, des précautions minutieuses sont nécessaires pour éviter l'action de forces électromotrices induites. Pour ces motifs, les mesures offrent moins de précision avec de gros courants qu'avec des courants faibles. La même observation s'appliquerait d'ailleurs à tous les types d'appareils ; et, pratiquement, il semble préférable, au-dessus de 100 ampères, d'employer des wattmètres montés sur transformateurs d'intensité.

» On a recherché les causes d'erreurs propres au wattmètre électrostatique et calculé l'influence des capacités réciproques des diverses parties de l'appareil (1). Ces influences sont négligeables avec des électromètres bien construits et dans le cas des fréquences usuelles. Il est utile de noter que la présence d'une résistance élevée en série avec l'aiguille fausse les mesures de puissance. Il serait donc incorrect d'intercaler dans le circuit de l'aiguille une grande résistance afin de protéger le fil de suspension contre des courts-circuits éventuels. La même remarque nous interdit d'employer des électromètres à fil de suspension très résistant, tels que les électromètres à fil de quartz.

» *Exemple numérique.* — Nous nous sommes servis, au Laboratoire, comme wattmètre électrostatique, d'un électromètre Moulin, construit par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs. Sa sensibilité peut être définie par la valeur de la constante k . La tension totale étant de 110 volts, et l'aiguille, connectée comme dans la figure 3, étant portée à 55 volts, on a $k = 7,3$ (exactement 7,28 pour une déviation de 98 mm ; et 7,32 pour une déviation de 145 mm).

» A titre d'exemple, soit à mesurer une puissance P dans les conditions suivantes : $U = 110$ volts ; $I = 2$ ampères ; $\cos \varphi = 0,15$ environ. Portant l'aiguille au potentiel $\frac{U}{2}$ et, prenant $R = 0,586$, on a une déviation α de 145 mm.

» D'où :

$$P = \frac{145}{7,32 \times 0,5865} = 33,8 \text{ watts.}$$

II. — MÉTHODE DE L'ÉLECTRODYNAMOMÈTRE DIFFÉRENTIEL

» *Principes et formules.* — Dans cette méthode, on se propose

(1) E. OHRlich, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1909, t. XXIX, p. 33.

d'équilibrer la puissance à mesurer, ou plutôt une fraction déterminée de celle-ci, par une autre puissance facilement accessible aux mesures, de la forme $\frac{U^2}{r}$ (puissance dissipée dans un circuit non inductif convenablement réalisé). A cet effet, on emploie un électrodynamomètre à miroir de grande sensibilité comportant deux bobines inductrices B_1 et B_2 , aussi identiques que possible, et une bobine induite mobile b . Le montage réalisé est celui de la figure ci-contre (fig. 4).

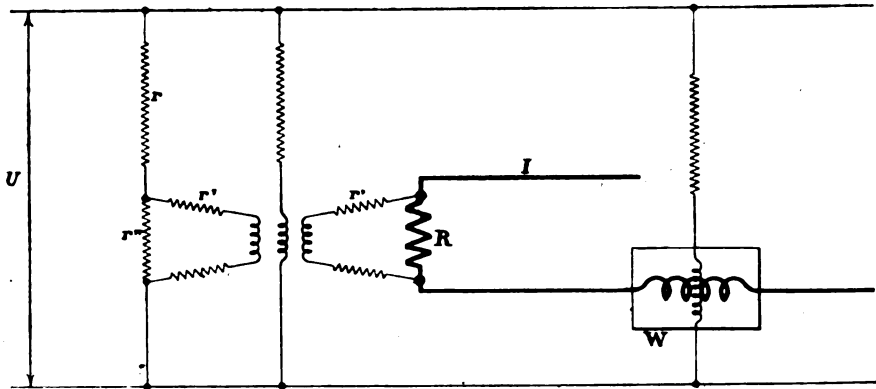


Fig. 4.

» Soit U la tension du réseau ; I le courant dans le circuit d'utilisation ; la puissance à mesurer a pour expression $U I \cos \varphi$. Dans le cas de la figure, qui correspond à l'étalonnage d'un wattmètre W , cette puissance est une puissance fictive. Supposons d'abord négligeables les inductances des circuits des bobines b , B_1 et B_2 . Les bobines b et B_1 sont alors parcourues par des courants en phase avec la tension U ; et la bobine B_2 par une dérivation du courant I , en phase avec celui-ci. Admettons aussi que l'appareil soit parfaitement symétrique. Quand l'équilibre est obtenu on a, avec les notations de la figure, les relations suivantes :

$$i' = I \cos \varphi = \cos \varphi \frac{R}{R + r'},$$

ou sensiblement :

$$i' = I \cos \varphi \frac{R}{r'},$$

R étant toujours très faible vis-vis de r' .

» D'autre part :

$$i = \frac{i r'}{r' + r'} = \frac{U}{r + \frac{r' r'}{r' + r'}} \times \frac{r'}{r' + r'}$$

donc :

$$\frac{U}{r + \frac{r' r'}{r' + r'}} \times \frac{r'}{r' + r'} = I \cos \varphi \frac{R}{r'}$$

d'où :

$$UI \cos \varphi = \frac{U^2}{r + \frac{r' r'}{r' + r'}} \times \frac{r' r'}{r' + r'} \times \frac{1}{R} \quad (1)$$

r, r', r', R sont des résistances non inductives supposées connues.

» La mesure de la puissance se trouve donc ramenée directement (et non plus indirectement comme dans la méthode du wattmètre électrostatique) à une mesure de tension. Celle-ci peut s'effectuer dans les conditions que nous avons exposées plus haut avec le même type d'appareil et le même degré de sensibilité.

» *Réglage de l'électrodynamomètre.* — Nous avons admis que les circuits des bobines n'étaient pas inductifs. Il est évident que cette hypothèse est inexacte. Mais le principe de la méthode reste valable rigoureusement dans tous les cas, pourvu que les trois circuits considérés possèdent *la même constante de temps*. On aura donc toujours soin de monter en série avec les bobines inductrices et induites des résistances (ou des inductances) appropriées, de manière à réaliser très exactement cette condition. Les vecteurs qui représentent les intensités dans les enroulements de l'électrodynamomètre tournent alors du même angle, sans changement de leur position relative. Les équations gardent la forme indiquée, avec cette modification qu'on substitue à la résistance r , l'impédance z' . Moyennant ces précautions, la méthode s'applique en toute correction quelle que soit la fréquence et quel que soit le hasage entre la tension et le courant.

» Quant à la symétrie de l'appareil, il est possible de l'obtenir d'une manière complète avec l'électrodynamomètre dont nous disposons (électrodynamomètre Siemens et Halske à miroir). Il suffit pour cela d'agir très légèrement sur les vis calantes, de ma-

nière à rapprocher la bobine mobile d'une des deux bobines fixes. D'ailleurs, si le réglage n'est pas absolument parfait, on peut éliminer les erreurs de dyssymétrie en interchangeant les circuits des inducteurs et en prenant la moyenne des résultats ainsi obtenus.

» *Exemple numérique.* — Pour donner une idée de l'ordre de grandeur des quantités qui entrent dans les formules, nous indiquons ci-dessous un exemple numérique :

» La tension $U = 120,2$ volts ; le courant I est d'environ 3 ampères, et le facteur de puissance est voisin de 0,5.

» On a :

$$r = 9\,000 \text{ ohms,}$$

$$r' = 7\,460 \text{ ohms,}$$

$$R = 0,368 \text{ ohm,}$$

$$r'' = 46,7 \text{ ohms.}$$

» On en déduit :

$$P = 201,5 \text{ watts.}$$

» Un dérèglage de 1 microampère dans le courant de la bobine B correspond à une déviation de 4 mm. Mais cette sensibilité, jugée suffisante dans la mesure considérée, pourrait être facilement augmentée. Il suffirait de réduire dans une proportion convenable les résistances montées en série avec les divers enroulements, de manière à accroître le courant dans la bobine mobile et dans les bobines fixes.

» En dehors de ce réglage, il est toujours possible d'augmenter la sensibilité de la méthode, en prenant une valeur plus élevée pour la résistance R . Mais on est assez vite limité dans cette voie ; pratiquement, la chute de tension admissible dans la résistance R ne doit guère dépasser 2 volts ; il faut même se tenir fort au-dessous de ce chiffre dans le cas de courants intenses.

» *Défauts et avantages de la méthode.* — La méthode de l'électrodynamomètre différentiel semble à première vue un peu compliquée. Dans la formule (1) interviennent quatre valeurs différentes de résistances (ou d'impédance) qu'il faut connaître exactement. De plus, il est nécessaire de régler préalablement les divers circuits de l'électrodynamomètre, de manière qu'ils possèdent la même constante de temps. Ce réglage, il est vrai, est fait une fois pour toutes, et les impédances z' peuvent être considérées comme des constantes de l'appareil.

» Indépendamment de ces difficultés de détail, la méthode de

l'électrodynamomètre différentiel offre les mêmes avantages que celle du wattmètre électrostatique, en particulier le même degré de souplesse qui permet de mesurer des puissances très diverses et d'étalonner des wattmètres de tous calibres en changeant seulement la résistance R . L'électrodynamomètre est d'ailleurs aussi sensible que l'électromètre et souvent d'un emploi plus commode. Mais le principal intérêt de la méthode réside dans son principe même. Elle présente tous les avantages des méthodes de zéro et supprime les erreurs et les difficultés inhérentes à l'étalonnement d'un appareil à déviation. »

BIBLIOGRAPHIE

Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones.

L'Administration des Postes, Télégraphes et Téléphones publie, depuis 1910, un bulletin technique trimestriel intitulé les « Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones », qui, dès son apparition, a été accueilli avec faveur par le public. A côté d'études approfondies sur la téléphonie automatique ou sans fil, les relais téléphoniques, les appareils télégraphiques à grand rendement français et étrangers, la radiotélégraphie, on en trouve d'autres non moins documentées sur l'anti-induction, l'électrification des voies ferrées, l'emploi de l'aluminium à la construction des lignes électriques, l'outillage mécanique des grands bureaux postaux.

La revue publie un résumé des travaux du Service d'Etudes et de Recherches techniques, du Comité technique des Postes et Télégraphes, et renferme, en outre, une analyse des périodiques en langue française et des traductions d'articles choisis dans les périodiques étrangers ; elle se termine par des informations sur des questions d'actualité et sur les progrès les plus récents réalisés à l'étranger au point de vue technique.

Les Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones apportent ainsi régulièrement aux techniciens de l'industrie aussi bien qu'à ceux de l'Etat une documentation complète sur les travaux en cours dans les laboratoires étrangers.

La publication est faite par les soins d'une commission nommée par M. le ministre des Postes et des Télégraphes, et qui, présidée par M. Dennery, inspecteur général, vice-président du Comité technique des Postes et Télégraphes, comprend parmi ses membres des personnalités comme celles de MM. Blondel, membre de l'Institut; le général Ferrié, Milon, directeur de l'Exploitation téléphonique; MM. les professeurs Henri Abraham et Gutton; M. Pomey, ingénieur en chef des Télégraphes.

Afin d'augmenter leur caractère d'actualité et de répondre au vœu exprimé par les abonnés, les Annales qui, jusqu'à présent, paraissaient tous les trois mois, paraîtront tous les deux mois à partir du 1^{er} février 1922.

L'Administration a confié l'édition des Annales à la Librairie de l'Enseignement technique (3, rue Thénard, Paris, 5^e).

IL Y A TRENTÉ ANS

Trembleur Ducretet. — Conjoncteur disjoncteur Ch. Fery (M. Picou). — Utilisation des chutes de la Valloirette (Saint-Michel-de-Maurienne) (M. Hillairet). — Sur les courants de grande fréquence et de grande tension (M. Tesla).

Le Gérant : J. GUYOT.

IMP. HENRIOT - 30, RUE CASSINI, PARIS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion mensuelle du mercredi 1^{er} mars 1922 : Admission de membres titulaires, p. 113. — Dons à l'École supérieure d'Electricité et au Laboratoire central d'Electricité, p. 114. — Liste des candidats proposés par le Comité pour le renouvellement partiel du Comité et du Bureau, p. 114. — Les unités de mesures électriques (M. LANGEVIN), p. 116. — Potentiomètre à déviation (M. ILIOVICI), p. 117. — Communications téléphoniques entre centrales (M. MARIUS LATOUR), p. 137.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 149.

BIBLIOGRAPHIE, p. 152.

IL Y A TRENTE ANS, p. 152.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 1^{er} mars 1922. ⁽¹⁾

PRÉSIDENCE DE M. JEAN REY.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes:

Clavel (Gérard-Marie-François), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 20, rue Ferreri, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, n'est pas responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Gaudriot (Emmanuel-François), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 5, rue de l'Amiral-Roussin, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Arnaud (Jean-Antoine), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 62, avenue de Breteuil, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Pahin (Lucien-Albert-Henri), Ingénieur à la Société des Transports en commun de la Région parisienne, 1, rue de l'Hôtel-de-Ville, à Pontoise (S.-et-O.). — Présenté par MM. Mazen et Périquier.

Trottier (Jean-Emile), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 45, rue Guersant, à Paris (17^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part des dons suivants :

Ecole :

Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à gaz :

un compteur Thomson ;
un compteur O. K. ;
deux bobines pour fluxmètres ;
un électromètre Moulin ;
deux rhéostats transformateurs.

Laboratoire :

Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à gaz :

Réparation de deux boîtes de résistance.

Il adresse à ce donateur les remerciements de la Société.

M. le PRÉSIDENT donne lecture de la liste des candidats proposés par le Comité pour le renouvellement partiel du Comité et du Bureau. Cette liste est la suivante :

Président pour l'Exercice 1923-1924

MM.

ESCHWEGE (P.), Directeur de la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité.

Vice-Présidents

LEBAUPIN (G.-L.), Chef du Laboratoire d'Electricité des Chemins de fer de l'Etat.

PARODI (H.), Chef des Services techniques du matériel et de la traction de la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans.

Secrétaire général

LEBLANC (Maurice) fils, Directeur de l'Usine de la Westinghouse-Leblanc.

Trésorier

MEYER (Marcel), Directeur de la Compagnie générale de Travaux d'Eclairage et de Force.

Secrétaires

BOSSU (P.), Ingénieur en chef de la Société Anonyme des Etablissements Blériot.

SANDSTROM (R.), Ingénieur Conseil.

Membres

BACHELLERY (A.), Ingénieur en chef du matériel et de la traction aux Chemins de fer du Midi.

BLONDIN (J.), Directeur de la Revue générale de l'Electricité.

BRETON (J.-L.), Membre de l'Institut.

BROCA (A.), Agrégé de la Faculté de Médecine.

CAUDRELIER (E.), Ingénieur à la Compagnie parisienne de Distribution d'Electricité.

DARRIEUS (G.), Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique.

DENNERY (A.), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, Directeur de l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes.

DURAND (A.), Sous-Directeur adjoint du Laboratoire central d'Electricité.

DUTILH (H.), Ingénieur, Constructeur d'appareils de mesures électriques.

GRANAT (E.), Ingénieur, Constructeur, fournisseur de la Guerre et de la Marine.

GRATZMULLER (L.), Ingénieur en chef du service de traction électrique à la Société alsacienne de Constructions mécaniques.

LOCHERER (J.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

MILDE (Ch), Gérant de la Maison Mildé et Cie.

PEROT (A.), Professeur de Physique à l'Ecole Polytechnique.

RATEAU (A.), Membre de l'Institut, Président du Conseil de la Société Rateau.

RECHNIEWSKI (W.-C.), Ingénieur.

SAGET (J.), Ingénieur Conseil de la Société de Purification industrielle des gaz.

TAINTURIER (C.), Ingénieur principal des Services électriques des Chemins de fer de l'Etat.

Commission des Comptes

CORNUAULT (A.), Directeur de la Compagnie continentale pour la Fabrication des Compteurs.

GUERY (F.), Ingénieur en chef des services électriques de l'Omnium lyonnais des Chemins de fer et Tramways.

De VALBREUZE (R.), Administrateur délégué des anciens établissements Deberghe et Lafaye.

Membre d'Honneur

KENNELLY, Membre de l'Université Harvard, Professeur au Massachusetts
Institut of Technology.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

Les unités de mesures électriques, par M. LANGEVIN.

Cette communication, ainsi que les observations qu'elle a provoquées
de la part de MM. ABRAHAM, BERTHELOT et BRYLINSKI, seront données dans
un prochain bulletin.

POTENTIOMÈTRE A DÉVIATION ET A LECTURE DIRECTE, TRANSPORTABLE (1)

Dans les potentiomètres employés habituellement, on règle certaines résistances jusqu'à obtenir l'équilibre d'un galvanomètre placé dans le même circuit que la différence de potentiel à mesurer. Dans l'appareil faisant l'objet du présent mémoire, le galvanomètre est normalement remplacé par un millivoltmètre, et le réglage se fait jusqu'à obtenir une déviation dans les limites de sa graduation. Des dispositions constructives rendent, d'autre part, le tarage du potentiomètre et la vérification du millivoltmètre indépendants de la mesure.

L'appareil ainsi réalisé est entièrement transportable et peut être installé sans précautions spéciales. Il permet des mesures très rapides avec une approximation de 0,1 pour 100. Lorsqu'on connaît suffisamment la différence de potentiel à mesurer, ce qui arrive surtout dans l'étalonnage des appareils de mesure, on pourra souvent faire la mesure sans aucun réglage.

M. A. ILIOVICI. — « L'étalonnage des appareils de mesure à l'aide des potentiomètres employés jusqu'à présent est une opération longue et délicate, parce que les méthodes qu'on emploie dans ces appareils sont des *méthodes de zéro*. Le réglage est surtout long si on ne dispose pas d'une différence de potentiel parfaitement constante ou d'un courant parfaitement constant pour alimenter les appareils à essayer.

» C'est pourquoi dans les laboratoires industriels on préfère vérifier les appareils de mesure à l'aide d'appareils étalons à déviation.

» Dans ce cas, le courant n'a pas besoin d'être d'une constance absolue ; il suffit qu'on puisse faire au même instant la lecture des deux appareils.

» Mais les appareils étalons peuvent varier aussi et ils ont besoin d'être étalonnés périodiquement au potentiomètre.

» Le potentiomètre que nous avons l'honneur de vous présenter est un appareil à *déviation* : il a donc l'avantage de permettre un étalonnage rapide, même si le courant dont on dispose n'est pas rigoureusement constant ; il a sur les appareils étalons l'avantage de permettre un étalonnage précis en partant de la pile étalon au cadmium. Sa précision est de l'ordre de 0,1 pour 100.

» *Principe.* — Considérons un circuit (fig. 1) comprenant une source P de force électromotrice E (par exemple un accumulateur), une résistance constante ρ et un rhéostat de réglage Rh. Entre deux points réglables A et B de la résistance ρ , dérivons un circuit contenant une pile étalon au cadmium C de force électromo-

(1) Construit par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à gaz.

trice e , montée en opposition avec la source P, et un millivoltmètre mV ou un galvanomètre.

» Si on règle le rhéostat R_h de façon à amener le millivoltmètre à l'équilibre, on a :

$$\frac{e}{r} = \frac{E}{R} = I_0, \quad (1)$$

r étant la portion de la résistance ρ comprise entre A et B, R la résistance totale du circuit contenant la source P, I_0 le courant qui traverse le circuit A B P A.

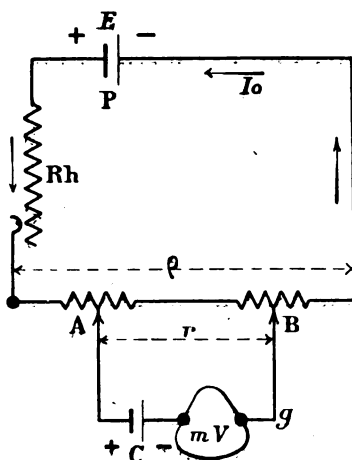


Fig. 1.

» Remplaçons maintenant la pile étalon par une différence de potentiel U à mesurer (fig. 2) et déplaçons les contacts A et B en A' et B' jusqu'à obtenir dans le millivoltmètre une déviation dans les limites de son échelle.

» Soit, dans ces conditions, I le courant débité par la source P, et i , le courant qui traverse le millivoltmètre ; pour fixer les idées, nous supposons que ce courant a le sens de la flèche f .

» Soit r' la portion de la résistance ρ comprise entre A' et B' et g la résistance de la branche B' C' contenant le millivoltmètre.

» Nous supposons la résistance A' D' négligeable et d'autre

part, que la résistance R n'a pas changé parce que nous ne touchons pas au rhéostat R_h .

» L'application des lois de Kirchhoff donne les relations suivantes :

$$U = r' (I + i) + gi, \quad (2)$$

et

$$E = r' (I + i) + (R - r') I,$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$E = RI + r'i \quad (3)$$

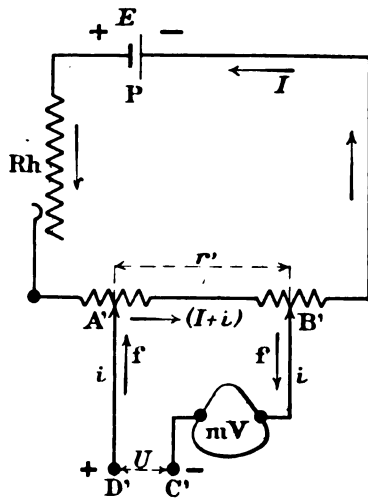


Fig. 2.

» En tirant I de (3) et en remplaçant dans la relation (2), celle-ci prend successivement les formes :

$$U = r' \frac{E - r' i}{R} + (r' + g) i,$$

et

$$U = \frac{r' E}{R} + gi + \frac{(R - r') i}{R}. \quad (2')$$

» Supposons qu'on gradue le millivoltmètre de façon qu'il in-

dique la différence de potentiel entre les points B' et C' et soit u son indication dans la dernière mesure. On a :

$$u = gi. \quad (4)$$

» En remplaçant dans la formule (2') $\frac{E}{R}$ et gi par leurs valeurs tirées de (1) et de (4) on a :

$$U = \frac{r' e}{r} + u + \frac{r'(R-r')}{R} i, \quad (2')$$

et si on néglige

$$\frac{r'(R-r')}{R} i,$$

U prend la valeur

$$U = \frac{r' e}{r} + u. \quad (6)$$

» Or, u est la lecture du millivoltmètre, tandis que $\frac{r' e}{r}$ est une différence de potentiel proportionnelle à r' . Si on marque entre A' et B' la valeur de $\frac{r' e}{r}$ au lieu de la valeur de r' correspondante, $\frac{r' e}{r}$ sera la lecture faite au potentiomètre. Dans ces conditions, la *valeur de la différence de potentiel à mesurer sera la somme des lectures du potentiomètre et du millivoltmètre.*

» Dans le potentiomètre que nous vous présentons, on lit sur celui-ci les dixièmes de volt, jusqu'à 17 dixièmes (ou 1,7 volt), et les centièmes de volt, et sur le millivoltmètre les millièmes et dix-millièmes de volt (1).

» Avant de décrire l'appareil, nous allons montrer que nous avons le droit de négliger le terme $\frac{r'(R-r')}{R} i$. Pour cela, évaluons l'erreur relative ε ainsi introduite.

$$\varepsilon = \frac{\frac{r'(R-r')}{R} i}{\frac{r' e}{r} + u},$$

(1) On peut aussi apprécier les cent millièmes de volt.

ou
$$\varepsilon = \frac{r'(R-r')i}{r'E + Rgi + r'(R-r')i},$$

ou encore
$$\varepsilon \leq \frac{r'(R-r')u}{(r'E + Ru)g} \quad (7)$$

» L'erreur ε dépend de r' et de u ; elle croît avec u . On se trouvera donc dans des conditions d'autant moins favorables que la lecture u au millivoltmètre sera plus grande.

» D'autre part, on a $\varepsilon = 0$ pour $r' = 0$ (c'est-à-dire lorsque le millivoltmètre sert seul à la mesure) et pour $r' = R$. Ce dernier cas ne se rencontre pas, car r' est toujours plus petit que R , mais on peut s'en rapprocher beaucoup. Entre ces deux limites, l'expression (7) passe par un maximum qui a lieu sur la valeur de r' :

$$r'_m = \frac{R \left[\sqrt{u^2 + uE} - u \right]}{E},$$

qu'on peut mettre sous la forme simple :

$$r'_m = R \sqrt{\frac{u}{E}} \quad (8)$$

en tenant compte de la grandeur relative de E et de u , ce qui permet de négliger certains termes devant d'autres.

» La valeur maximum de (7) est :

$$\frac{Ru}{g \left[\sqrt{u} + \sqrt{u + E} \right]^2},$$

» Il en résulte, pour la valeur maximum de ε , la relation :

$$\varepsilon_m \leq \frac{R}{g} \cdot \frac{u}{\left(\sqrt{u} + \sqrt{u + E} \right)^2},$$

ou encore :

$$\varepsilon \leq \frac{R}{g} \cdot \frac{u}{\left(\sqrt{u} + \sqrt{E} \right)^2},$$

et enfin :

$$\varepsilon \leq \frac{R}{g} \cdot \frac{u}{E} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{u}{E}} \right). \quad (8)$$

» Cette formule montre qu'on peut rendre ε_m aussi petit que l'on veut en réduisant d'une part le rapport entre la résistance du circuit principal R et celle du circuit contenant le millivoltmètre et, d'autre part, le rapport entre la tension u mesurée par le millivoltmètre et la tension E de la source.

» Dans notre potentiomètre, on a adopté : $R = 40$ ohms environ ; $g = 300$ ohms, $u \leq 0,01$ volt, $E = 2$ volts environ. On a donc : $r'm = 40 \sqrt{\frac{0,01}{2}}$, soit environ 2,8, ce qui correspond à une tension de 0,14 volt,

» La valeur de ε_m correspondante est :

$$\varepsilon_m \leq \frac{40}{300} \cdot \frac{0,10}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{2}{200}} \right)$$

ou

$$\varepsilon_m \leq 0,57 \text{ pour } 1 \text{ 000.}$$

» Donc, dans le cas le plus défavorable, l'erreur systématique introduite ne dépasse pas 6 pour 10 000. On peut même la ramener à 3 pour 10 000, comme nous le verrons plus loin ; et encore cette erreur maximum correspond à une faible tension (0,14 volt) ; pour les autres, l'erreur ε est encore plus faible.

» La précision du potentiomètre étant de l'ordre de 0,1 pour 100, on peut négliger l'erreur systématique ε .

AVANTAGES DU POTENTIOMÈTRE A DÉVIATION

» En dehors de la particularité du potentiomètre d'être un appareil à déviation, on a cherché et obtenu les résultats suivants :

» 1° Absence de fil calibré, susceptible de s'user et d'occasionner de mauvais contacts ;

» 2° Emploi d'un millivoltmètre industriel, ce qui rend l'appareil complètement transportable ; si on le trouve utile, on peut d'ailleurs remplacer le millivoltmètre par un galvanomètre et une échelle graduée ;

» 3° Impossibilité pour les circuits de l'appareil à étalonner et de la pile d'être fermés d'une façon inopportune ; on arrive à ce résultat par la combinaison d'un commutateur et d'un interrupteur. La pile étalon n'est donc pas exposée à débiter des courants trop forts et le millivoltmètre ne risque pas de recevoir des chocs électriques ;

» 4° On peut tarer le potentiomètre ou vérifier le millivoltmètre sans changer le réglage correspondant à la mesure, de sorte que, après tarage on se trouve dans les mêmes conditions qu'auparavant, et on peut se rendre compte de l'influence que le nouveau tarage a eu sur le résultat ;

» 5° Un dispositif simple permet une vérification et un réglage rapide du millivoltmètre : en plaçant le commutateur, que comporte l'appareil, sur le plot VMV, le millivoltmètre doit donner 100 divisions, sinon on le règle à l'aide d'un shunt magnétique.

DESCRIPTION DU POTENTIOMÈTRE.

» *Circuits.* — Le potentiomètre se compose (fig. 3 et 3 bis) de deux rhéostats circulaires à plots R_1 et R_2 , et de deux rhéostats circu-

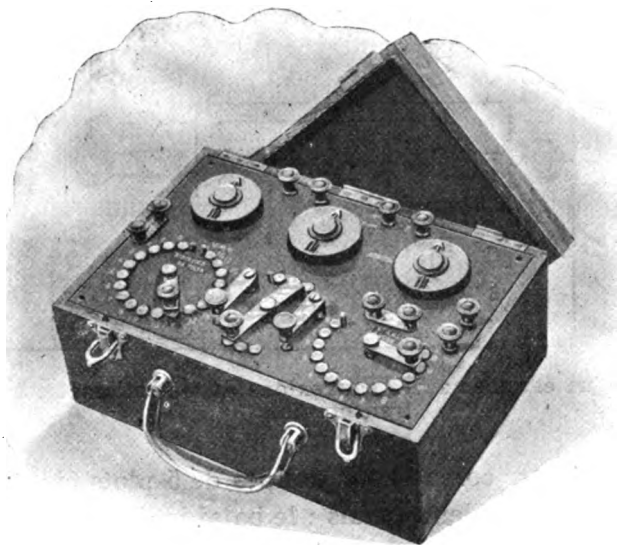


Fig. 3. — Potentiomètre à déviation, transportable.

lares continus R_1 et R_2 en dérivation l'un sur l'autre et en série avec les deux premiers. Le rhéostat R_1 est formé de 17 résistances r_1 en série, égales chacune à environ 2 ohms ; R_2 est composé de 10 résistances r_2 égales chacune au dixième de l'une des résistances r_1 .

» Le circuit constitué par les rhéostats R_1 , R_2 , R'_1 et R'_2 est branché en c et d aux bornes d'un accumulateur de 2 volts environ.

Un interrupteur I permet de couper ou de faire passer le courant dans ce circuit.

» Deux manettes M_1 et M_2 servent à faire varier la différence de potentiel qu'on suppose à e , (rI_0 dans la fig. 1), ou à U , ($r'(I + i)$ dans la fig. 2).

» Le commutateur double C sert à réaliser facilement et indépendamment l'une de l'autre les trois opérations utiles : *le tarage du potentiomètre*, c'est-à-dire réglage du courant I_0 (voir fig. 1), *la vérification de l'exactitude du millivoltmètre* et *la mesure de la différence de potentiel donnée* (voir fig. 2).

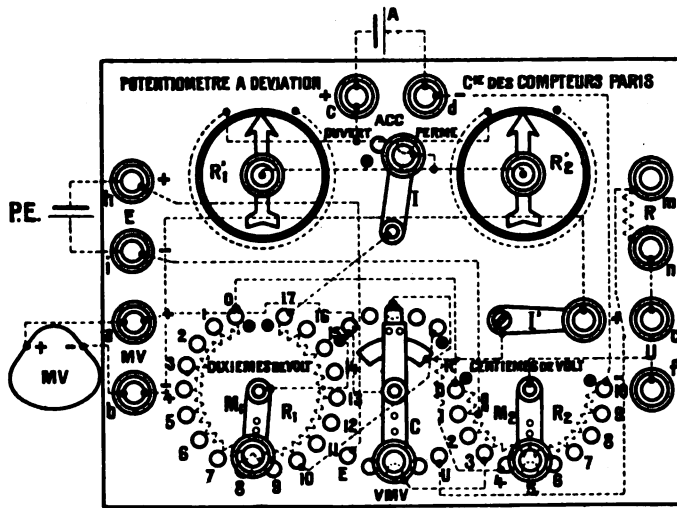


Fig. 3 bis. — Vue et schéma des connexions du potentiomètre à déviation, transportable.

» Ce commutateur comporte 2 groupes de 5 plots (dont 2×3 utiles). Sa manette porte deux balais : le balai inférieur sert à mettre en relation le plot sur lequel il se trouve avec l'axe, le balai supérieur — isolé électriquement de la manette — met en relation électrique le plot sur lequel il se trouve avec un secteur métallique.

» Les bornes a, b, c, d, h, i, servent à établir les connexions avec le millivoltmètre, l'accumulateur, la pile étalon, etc., comme on le verra plus loin.

» Les connexions intérieures sont établies de la façon suivante (fig. 3 bis). La borne c est reliée à un point commun aux deux rhéostats R_1 et R_2 , montés en dérivation ; l'autre extrémité commune de ces rhéostats est reliée au plot marqué « Fermé » de l'in-

interrupteur I ; la manette de cet interrupteur est reliée au plot 17 du rhéostat à plots R_1 , dont le plot 0 est connecté au plot 0 du rhéostat R_2 . Le plot 10 de ce rhéostat est enfin connecté à la borne d. On constitue ainsi un circuit fermé sur lequel débite l'accumulateur A, lorsque l'interrupteur I est fermé.

» L'axe du commutateur C est relié à la borne a et son secteur à la borne b en passant par l'interrupteur I'.

» Les plots de ce commutateur sont reliés respectivement : le plot marqué U à la borne m, puis à travers la résistance R de 150 ohms aux bornes n et c ; le plot diamétralement opposé à la manette M_1 ; le plot marqué VMV au plot 3 du rhéostat R_2 et celui diamétralement opposé au plot 4 de R_2 à travers une résistance R' de 150 ohms ; enfin, le plot marqué E à la borne h et le plot opposé au plot 10 du rhéostat R_1 .

» Deux autres connexions intérieures relient respectivement la borne f à la manette M_2 et la borne i à un point g de la résistance comprise entre les plots 1 et 2 du rhéostat R_2 . La résistance 1 g vaut $0,84 r_2$ (r_2 étant la résistance entre deux plots du rhéostat R_2), soit 0,168 ohm.

» En examinant la fig. 3 bis, on constate que :

» 1° Lorsque la manette du commutateur se trouve sur le plot E, la pile étalon connectée aux bornes h, i se trouve en série avec le millivoltmètre MV connecté aux bornes a, b, et avec l'interrupteur I'. Le circuit ainsi constitué se trouve en dérivation sur le circuit principal entre le plot 10 du rhéostat R_1 et le point g du rhéostat R_2 . On réalise ainsi un montage équivalent à celui de la fig. 1, avec $r = 101,84, r_2 = 10,184 r_1$.

» 2° Lorsque la manette du commutateur est placée dans la position U, les bornes e, f, marquées U, entre lesquelles on montera la différence de potentiel à mesurer, se trouvent en série avec la résistance R ⁽¹⁾, avec le millivoltmètre MV, et avec l'interrupteur I', le circuit ainsi constitué étant monté en dérivation sur le circuit principal en deux points variables par l'intermédiaire des manettes M_1 et M_2 .

» Le montage ainsi obtenu est équivalent à celui de la fig. 2.

» 3° Dans la position VMV du commutateur C, le millivoltmètre se trouve en série avec la résistance R' ⁽¹⁾, le tout étant en dérivation sur le circuit principal entre les plots 3 et 4 du rhéostat R_2 .

(1) On verra plus loin l'utilité des résistances R et R' .

» *Millivoltmètre.* — Le millivoltmètre affecté à ce potentiomètre est un appareil de contrôle du type CTIV ⁽¹⁾, dont la résistance entre bornes est de 150 ohms. Il a le zéro au tiers de la graduation et il porte 100 divisions à droite du zéro et 50 à gauche. Son aiguille dévie de 100 divisions pour 5 millivolts à ses bornes ; mais lorsqu'il est connecté au potentiomètre il se trouve en série soit avec la résistance R soit avec R_1 ; dans les deux cas, la résistance totale de son circuit est de $2 \times 150 = 300$ ohms. Il donne, dans ces conditions, la déviation de 100 divisions pour 0,01 volt, soit 10 millivolts aux extrémités du circuit total. C'est pourquoi on a marqué 1, 2, 3, ...10 aux traits 10, 20, 30, ...100, pour qu'on lise directement les millivolts qu'il mesure lorsqu'il est employé avec le potentiomètre.

» Le réglage de la sensibilité du millivoltmètre se fait à l'aide d'un shunt magnétique.

RÉDUCTEUR DE TENSION.

» *Principe.* — Le potentiomètre tel qu'il vient d'être décrit peut servir à la mesure d'une tension inférieure ou égale à 1,8 volt. Pour les tensions supérieures, on se sert d'un *réducteur de tension* qui se compose en principe de deux résistances.

» En montant la différence de potentiel U à mesurer aux bornes $E' F'$ on obtient entre les bornes D' et C' une différence de potentiel U' qu'on oppose à la différence de potentiel entre les points A' et B' du potentiomètre (fig. 4). On peut régler les résistances R' et R'' formant le circuit $E' D' C' F'$ de façon que U' soit inférieure à 1,8 volt.

» Dans les potentiomètres habituels, le courant i étant nul au moment de la lecture on a :

$$U' = \frac{R'}{R' + R''} U, \quad (9)$$

» Dans l'appareil décrit on a, en général, i différent de zéro ; il est donc nécessaire de se rendre compte des conséquences de cette inégalité.

⁽¹⁾ Le millivoltmètre peut être remplacé par un autre millivoltmètre ou par un galvanomètre ; il suffit que sa résistance, augmentée de celle qu'on peut être amené à mettre en série avec lui pour régler sa sensibilité, soit supérieure à 150 ohms.

» Considérons le circuit de la figure 4. L'application des lois de Kirchhoff donne les relations :

$$U = R' (I' - i) + R'' I', \quad (10)$$

$$E = r' (I + i) + (R - r') I, \quad (11)$$

et

$$R' (I' - i) = r' (I + i) + g'i, \quad (12)$$

en supposant qu'on s'est arrangé de façon que la résistance du circuit B' C' soit égale à g' (nous verrons que g' doit être plus petit que g).

» De ces formules, on tire facilement la relation :

$$\frac{R'}{R' + R'} U = \frac{r' E}{R} + \left[g' + \frac{R' R'}{R' + R'} + \frac{r' (R - r')}{R} \right] i. \quad (13)$$

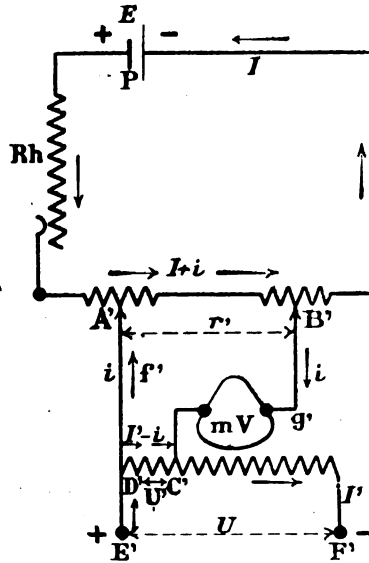


Fig. 4

» Si, dans cette relation, on remplace $\frac{E}{R}$ par $\frac{e}{r}$ ⁽¹⁾, si on choisit g' de façon à avoir :

$$g' + \frac{R' R'}{R' + R'} = g, \quad (13')$$

et si l'on néglige $\frac{r' (R' - r')}{R}$ devant g ⁽²⁾, on trouve :

$$\frac{R'}{R' + R'} U = \frac{r' e}{r} + g i. \quad (13'')$$

⁽¹⁾ Voir formule (1).

⁽²⁾ Ce terme est effectivement négligeable.

» Or, $g i = u$ est l'indication du millivoltmètre, on a donc :

$$\frac{R'}{R + R'} U = \frac{r' e}{r} + u. \quad (14)$$

» En confrontant cette formule avec les relations (6) et (9) on conclut que :

» *La différence de potentiel à mesurer U réduite dans le rapport $\frac{R'}{R + R'}$ comme dans les potentiomètres à zéro, est égale, dans notre appareil, à la somme des lectures faites au potentiomètre et au millivoltmètre.*



Fig. 5. — Réducteur de tension pour potentiomètre.

» Nous indiquerons, dans la description du réducteur de tension, le dispositif adopté pour satisfaire à la condition (13') pour tous les rapports de réduction.

» *Description du réducteur (fig. 5 et 5 bis).* — Le réducteur de tension se compose d'une série de résistances, d'un commutateur double C' ⁽¹⁾ et de six bornes.

» Devant chacun des plots inférieurs du commutateur est marqué

⁽¹⁾ Ce commutateur est identique à celui du potentiomètre: le balai supérieur est isolé de la manette et sert à relier électriquement les plots supérieurs au secteur en laiton; le balai inférieur non isolé de la manette sert à relier les plots inférieurs à l'axe.

le rapport $\frac{R' + R}{R'}$ correspondant, c'est-à-dire le nombre par lequel il faut multiplier la lecture du potentiomètre pour avoir la valeur de la différence de potentiel U à mesurer. On a marqué aussi la limite de la tension qu'on peut mesurer avec chaque rapport de réduction.

» Bornes : Les bornes marquées R sont réunies par un fil métallique et servent à mettre en court-circuit la résistance R du potentiomètre; aux bornes U on doit connecter la différence de potentiel à mesurer, les bornes UP doivent être connectées aux bornes U du potentiomètre.

» La borne $+$ de U est reliée à l'extrémité gauche de la résistance du réducteur et à la borne $+$ de UP .

» Les autres connexions intérieures sont visibles nettement sur la fig. 5 bis.

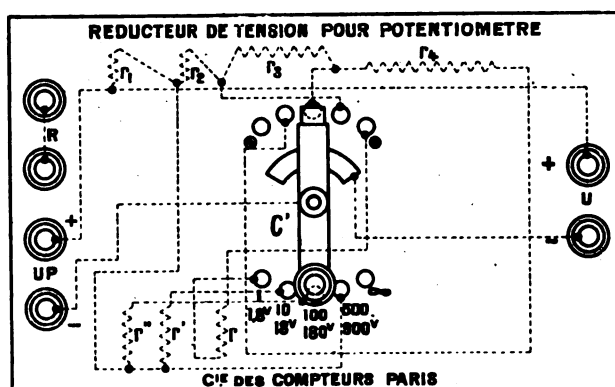


Fig. 5 bis. — Vue et schéma de connexions du réducteur.

» *Fonctionnement du réducteur.* — Lorsque la manette du commutateur se trouve sur le plot 1, la borne $-U$ est reliée à la borne $-UP$ à travers la résistance r , de 150 ohms. On se trouve donc exactement dans les mêmes conditions que si on employait le potentiomètre seul. Cette disposition a été adoptée pour permettre le montage constant du réducteur sur le potentiomètre.

» Si la manette de C' se trouve sur le plot 10, 100 ou 500, les bornes UP sont connectées aux extrémités de la résistance r , de 150 ohms (qui constitue la résistance R' de la fig. 4) ; le circuit

partant de la borne — UP contient une des résistances r' ou r'' , dont la valeur a été déterminée par la condition (13').

» En même temps, la borne — U est reliée à l'extrémité d'une des résistances r_2 , $r_2 + r_3$ ou $r_2 + r_3 + r_4$ (qui constitue la résistance R'' de la fig. 4), cette résistance étant respectivement 9,99 ou 499 fois la résistance r_1 , soit 1 350, 14 850 ou 74 850 ohms.

» On a ainsi pour $\frac{R' + R''}{R'}$ les valeurs marquées devant les plots correspondants [1, 10, 100 ou 500].

MODE D'EMPLOI DU POTENTIOMÈTRE.

» Avant de faire une mesure au potentiomètre, il convient de le *tarer* (c'est-à-dire de régler le courant I_0 dans le circuit principal) et de vérifier le millivoltmètre. Si on a des séries de mesures à faire, on vérifiera, en cours d'opération et aussi souvent qu'on le trouve utile, que le tarage est conservé ; sinon on fera les retouches nécessaires.

» Dans notre potentiomètre, on peut faire cette opération sans changer la position des manettes M_1 et M_2 correspondant à la mesure, ce qui est très intéressant, car on peut se rendre compte si le nouveau tarage a changé sensiblement le résultat de la mesure.

» 1° *Tarage du potentiomètre.* — On se sert d'une pile étalon au cadmium (f. é. m. 1,0184 volt) ; on place le commutateur C' dans la position E, on ferme l'interrupteur I et on règle les rhéostats R'_1 et R'_2 jusqu'à obtenir que l'aiguille du millivoltmètre reste au zéro, lorsqu'on ferme l'interrupteur I'.

» Il convient de donner tout d'abord à l'un des rhéostats, par exemple R'_2 , la plus grande valeur, et de régler R'_1 jusqu'à atteindre à peu près l'équilibre ; on finit le réglage en agissant sur R'_2 . En opérant ainsi, on obtient facilement le zéro du millivoltmètre malgré que les résistances R'_1 et R'_2 n'ont pas de variations tout à fait continues.

» 2° *Vérification et réglage du millivoltmètre.* — Cette opération doit être faite après tarage.

» On place la manette du commutateur C dans la position VMV ; le millivoltmètre doit dévier à droite de 100 divisions (il doit indi-

quer 10 millivolts). Si la déviation est différente de 100 divisions, on y ramène l'aiguille en agissant sur le shunt magnétique ⁽¹⁾.

» 3° *Mesure d'une différence de potentiel.* — La différence de potentiel à mesurer étant placée entre les bornes marquées U du potentiomètre, ou du réducteur lorsqu'on emploie celui-ci, on déplace les manettes M_1 et M_2 jusqu'à ce que l'aiguille du millivoltmètre se trouve dans la limite de l'échelle vers la droite.

» On lit alors les dixièmes et les centièmes de volt sur le potentiomètre, et les millièmes et les dixmillièmes de volt sur le millivoltmètre. Si on se sert du réducteur, le résultat obtenu sera multiplié par le coefficient indiqué sur celui-ci.

» *Exemple :* Si la manette M_1 se trouve sur le plot 14, la manette M_2 sur le plot 7 et l'aiguille du millivoltmètre sur la 3° division après celle marquée 6 à droite, et si la manette du réducteur se trouve sur le plot 10, la différence de potentiel aux bornes du potentiomètre est de 1,4763 volt et la différence de potentiel mesurée (aux bornes du réducteur) est de 14,763 volts.

» *Remarques :* 1° Les trois opérations: tarage, vérification du millivoltmètre et mesure étant indépendantes, il est impossible de faire de fausses manœuvres, car en plaçant le commutateur sur la position appropriée, le potentiomètre se trouve automatiquement dans les conditions nécessaires à l'opération qu'on veut réaliser.

» 2° Si on connaît approximativement la tension à mesurer, on pourrait obtenir le résultat du premier coup ; dans tous les cas, on n'a que très peu de réglage à faire.

» 3° Si la déviation du millivoltmètre est supérieure à 5 millivolts, on peut déplacer la manette M_2 d'un plot vers la droite ; la

(1) Dans cette opération la résistance totale du circuit du millivoltmètre est de $g = 300$ ohms, comme dans la mesure suivante, grâce à l'introduction de la résistance $R' = 150$ ohms. Le principe de cette vérification est le suivant : le potentiomètre étant taré la différence de potentiel aux bornes de chaque résistance unitaire r_1 du rhéostat R_1 est de 10 millivolts. (On a $I_0 = 0,05$ A, et $r_1 = 0,2$ ohm, donc $r_1 I_0 = 0,01$ volt.)

Lorsque le millivoltmètre est monté aux bornes de r_1 le régime du potentiomètre est légèrement troublé, la différence de potentiel aux bornes de la résistance r_2 est réduite de 0,06 pour 100 de sa valeur, mais cette erreur est tout à fait négligeable, surtout qu'elle ne porte que sur le millivoltmètre, dont la lecture ne constitue qu'une partie de la valeur de la différence de potentiel qu'on mesure.

déviations de l'appareil se fera alors vers la gauche et sera inférieure à 5 millivolts ; dans ce cas, il faut retrancher son indication de celle du potentiomètre.

» *Exemple* : Dans le cas précédent, si on avait placé la manette M_2 sur le plot 8, on aurait trouvé sur le millivoltmètre 3,7 millivolts à gauche et le résultat aurait été $1,48 - 0,0037 = 1,4763$ (aux bornes du potentiomètre).

EXEMPLES D'APPLICATIONS.

» a) *Etalonnage d'un voltmètre.* — Un montage commode est celui donné par la figure 6, qui est suffisamment explicite. Avant tout

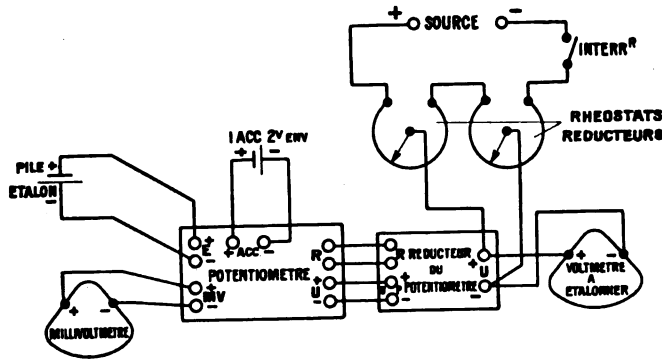


Fig. 6. — Montage du potentiomètre pour l'étalonnage d'un voltmètre.

réglage, il convient de placer la manette du réducteur sur le plot *infini*. On règle les deux rhéostats circulaires de façon à avoir dans le voltmètre la tension voulue. On coupe l'interrupteur de la source, on place la manette C' du réducteur dans la position appropriée à la tension à mesurer, on ferme l'interrupteur I du potentiomètre et on opère comme il est indiqué plus haut.

» *Remarques* : 1° Faire la lecture du voltmètre en même temps que celle du millivoltmètre ; l'interrupteur I étant fermé.

» 2° Couper le courant de la source lorsqu'on change le rapport de réduction du réducteur.

» b) *Etalonnage d'un ampèremètre.* — Un montage commode est celui donné par la fig. 7. Le potentiomètre mesure la différence de potentiel aux bornes de la résistance étalon.

» *Remarque* : Même remarque que 1° ci-dessus.

» c) *Mesure d'une faible résistance.* — On la compare avec une résistance étalon montée en série dans le même circuit (fig. 8). On mesure au potentiomètre la différence de potentiel aux bornes des deux résistances en maintenant le courant constant.

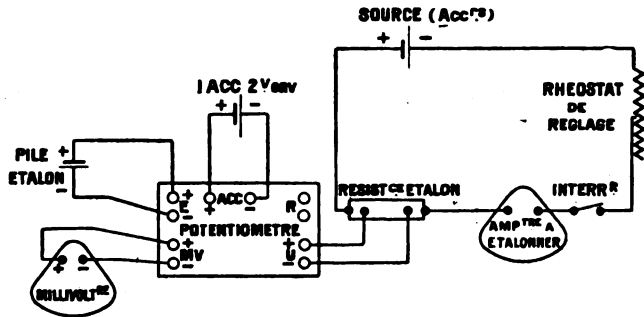


Fig. 7. — Montage du potentiomètre pour l'étalonnage d'un ampèremètre.

» Le rapport des résistances est égal au rapport des différences de potentiel trouvées.

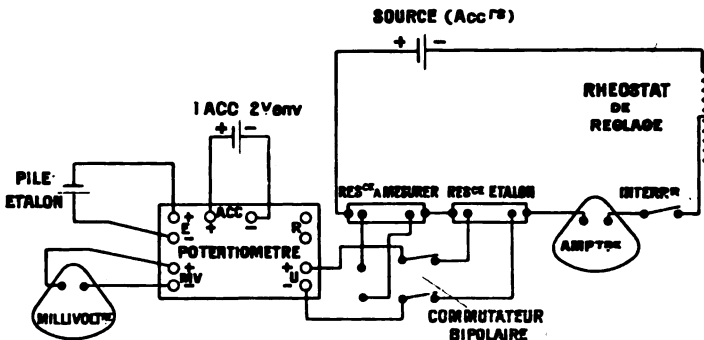


Fig. 8. — Montage du potentiomètre pour la mesure d'une résistance.

» *Remarque* : On fera plusieurs mesures alternées et on prendra la moyenne des résultats.

LIMITES D'EMPLOI DU POTENTIOMETRE A DEVIATION.

» 1° *Pour la mesure des tensions.* — La limite supérieure est de 900 volts, mais on peut aller plus loin en ajoutant des résistances en série avec le réducteur.

» La limite inférieure peut être de 1 millivolt ; dans la mesure de tensions inférieures à 10 millivolts, le millivoltmètre intervient

seul. L'approximation obtenue dépend alors de l'erreur de lecture sur le millivoltmètre.

» On peut même, après avoir vérifié et réglé le millivoltmètre à l'aide du potentiomètre, comme nous l'avons indiqué au paragraphe « Vérification du millivoltmètre », s'en servir comme appareil étalon ; dans ce cas, le maximum de sa déviation correspond à 5 millivolts, et on pourrait mesurer jusqu'à 0,5 millivolt (10 divisions de l'échelle).

» Notre potentiomètre est destiné surtout à la vérification des appareils de mesure, mais on peut s'en servir pour la mesure de différence de potentiel ou de force électromotrice quelconque (par exemple, force électromotrice de piles), à condition que ces mesures ne soient pas faussées par le courant dans le millivoltmètre, qui est toujours inférieur à $\frac{10}{300} = \frac{1}{30}$ milliampères ou 33 microampères ; si on s'arrange pour ne pas dépasser 50 divisions du millivoltmètre, en se servant au besoin de la partie de son échelle située à gauche du zéro, ce courant ne dépasse pas 16 microampères environ.

» 2° *Pour la mesure d'un courant.* — On sait que la mesure d'un courant se ramène à celle d'une différence de potentiel aux bornes d'une résistance. Dans ce cas, les limites du courant mesurable peuvent être aussi étendues qu'on le veut. Il suffit de choisir pour chaque courant, une résistance appropriée, telle que la différence de potentiel à ses bornes se trouve dans les limites indiquées en 1°.

» Mais on doit faire attention à la formule à utiliser pour calculer le courant. Nous allons établir cette formule.

» Soit fig. 9, le schéma de montage. Cette figure est analogue à la fig. 4. Il en résulte qu'on peut lui appliquer les mêmes formules. Or, des formules (11) et (12) on peut déduire la relation :

$$R' I' = \frac{r' E}{R} + \left[R' + g' + \frac{r' (R - r')}{R} \right] i, \quad (15)$$

» Si dans cette formule, on remplace $\frac{E}{R}$ par $\frac{e}{r}$ et si on néglige $\frac{r' (R - r')}{R}$ devant $R' + g'$, comme nous l'avons fait dans les cas précédents, on a :

$$R' I' = \frac{r' e}{r} + (g' + R) i. \quad (15')$$

» Dans la mesure des courants, on se sert soit du potentiomètre

seul, soit avec le réducteur sur le rapport 1 ; dans les deux cas, on a $g' = g = 300$ ohms et, en remarquant que $gi = u$, la formule (15') prend la forme :

$$R' I' = \frac{r' e}{r} + u + \frac{R'}{g} u; \quad (16)$$

d'où :

$$I' = \frac{\frac{r' e}{r} + u}{R'} + \frac{u}{g}; \quad (17)$$

Si on néglige $\frac{u}{g}$, on trouve :

$$I' = \frac{\frac{r' e}{r} + u}{R'}. \quad (17')$$

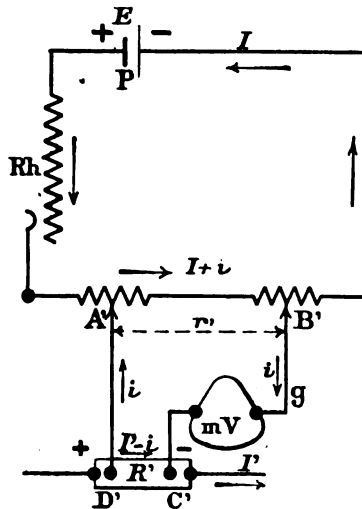


Fig. 9

» Le courant à mesurer I' est donc, dans ces conditions, le rapport entre la tension mesurée par le potentiomètre et la résistance R' ; formule analogue à celle des potentiomètres à zéro.

» Remarquons que le terme négligé $\frac{u}{g}$ est égal au courant i qui passe dans le millivoltmètre. Si l'on veut que l'erreur introduite en négligeant $i = \frac{u}{g}$ ne dépasse pas 0,1 pour 100, il faut qu'on ait :

$$\frac{i}{I'} \leq 0,001$$

d'où :

$$I' \geq 1000 i \quad (18)$$

» Dans le cas le plus défavorable $i \leq \frac{1}{30\,000}$ ampère ou $i \leq \frac{1}{60\,000}$ ampère, suivant qu'on limite la déviation du millivoltmètre à 10 ou à 5 millivolts.

» De la formule (18) il résulte donc que :

$$\text{si } I \geq \frac{1\,000}{30\,000} \quad \text{ou} \quad I \geq \frac{1\,000}{60\,000}$$

suivant le cas, c'est-à-dire si

$$I \geq \frac{1}{30} \text{ ampère} \quad \text{ou} \quad I \geq \frac{1}{60} \text{ ampère}$$

on peut employer la formule simplifiée (17') sans craindre une erreur supérieur à 0,1 pour 100.

» Ces limites sont largement suffisantes pour les besoins de la pratique.

» Si on a besoin de mesurer des courants inférieurs, on peut employer la formule plus générale (17) ; le terme correctif $\frac{u}{g} = \frac{u}{300}$ est facile à calculer, u étant l'indication du millivoltmètre.

» En résumé, en proportionnant convenablement les résistances, des divers circuits et la différence de potentiel mesurée par le millivoltmètre, nous avons réalisé un potentiomètre à déviation dans lequel les erreurs systématiques sont négligeables eu égard à la précision demandée à l'appareil (0,1 pour 100).

» Ce potentiomètre est d'un emploi très commode et il permet des mesures rapides et précises : ceci tient à son principe même, et aussi à certains dispositifs dans sa construction. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Iliovici.

COMMUNICATIONS TÉLÉPHONIQUES ENTRE CENTRALES (1)

Les communications téléphoniques entre centrales assurées par les moyens ordinaires ne vont pas sans présenter de sérieuses difficultés, dues au voisinage des lignes à haute tension et des conducteurs des téléphones. La présente communication décrit deux dispositifs originaux destinés soit à supprimer les perturbations dues aux lignes haute tension, soit à utiliser ces lignes elles-mêmes en modulant à haute fréquence les communications téléphoniques.

M. Marius LATOUR. — « Les communications entre les stations centrales pour lignes à haute tension se font actuellement en Europe soit par des lignes téléphoniques posées sur les mêmes poteaux que les lignes de transmission d'énergie ou situées sur un parcours voisin de ces lignes de transmission, soit par des postes de téléphonie à haute fréquence utilisant les lignes mêmes de transmission d'énergie.

» Il a été question également d'utiliser des postes de téléphonie sans fil pour relier les centrales entre elles, mais ces installations ne sont pas encore entrées dans la pratique courante.

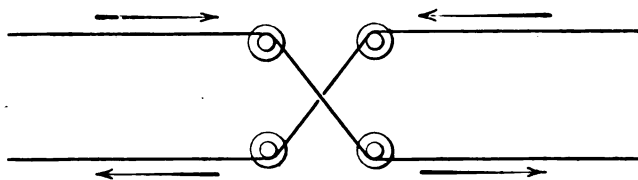


Fig. 1.

» Dans le cas de la transmission par ligne téléphonique, on cherche d'abord à réduire le plus possible les effets d'induction de la ligne à haute tension sur la ligne téléphonique en croisant les fils téléphoniques de distance en distance comme il est représenté sur la figure 1.

» Si l'on doit redouter que la ligne à haute tension puisse entrer en contact avec la ligne téléphonique, on isole la ligne téléphonique du poste téléphonique proprement dit par un transformateur à haute tension. Ce transformateur, s'il est bien construit, n'introduit pas d'affaiblissement appréciable pour le courant téléphonique. Il peut, d'ailleurs, servir lui-même de bobine d'induction, par exemple, suivant le schéma représenté par la

(1) Communication faite à la séance du mercredi 1^{er} février 1922.

figure 2 (voir notre brevet n° 476 872) et on évite de cette façon l'affaiblissement habituel introduit, par ailleurs, par la bobine d'induction usuelle qui est souvent de l'ordre de 1/2 (1/2 mile standard). Les appels peuvent se faire directement par l'enrou-

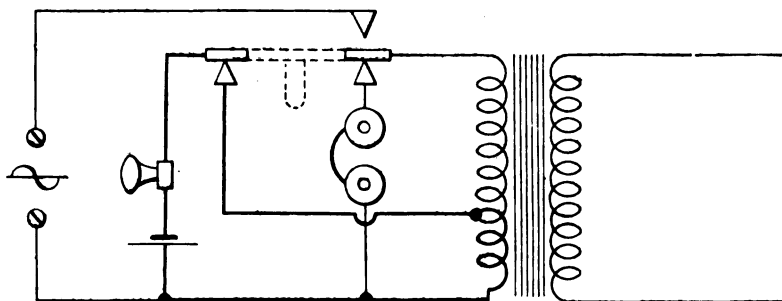


Fig. 2.

lement primaire avec le courant du réseau, ainsi qu'il est représenté sur la figure 2.

» A ce point de vue, il convient d'observer que le transformateur, pour ne pas absorber trop de courant magnétisant à la fréquence des courants d'appel, doit avoir des self-inductances primaires et secondaires bien plus importantes que ne le demanderait son fonctionnement en transformateur téléphonique pour la fréquence de 800 périodes par seconde.

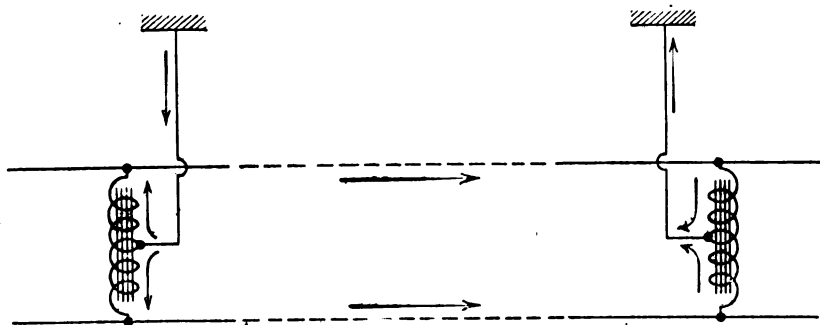


Fig. 3.

» Dans certaines installations, on dispose des bobines de décharge de place en place (voir notre brevet n° 473 498) le long de la ligne pour mettre la ligne téléphonique à la terre sans la court-circuiter au point de vue téléphonique, comme il est représenté sur la figure 3.

» Les bobines de décharge sont montées en dérivation sur la li-

gne, tandis que leur point milieu est réuni à la terre. La construction de ces bobines doit être telle que les deux moitiés de la bobine présentent peu de fuites magnétiques entre elles. Il convient d'observer également que le courant amené à la terre peut être assez important. Il s'agit, en effet, non seulement d'écouler le courant d'origine statique, mais aussi le courant dû à l'induction électrodynamique et pour laquelle les deux fils téléphoniques travaillent en parallèle.

» Les bobines de décharge seront prévues en conséquence.

» Avec les précautions que nous venons d'indiquer, on doit arriver à obtenir une communication presque satisfaisante entre les centrales.

» Plus récemment, nous avons développé cependant un système qui est basé sur l'utilisation des amplificateurs et qui nous

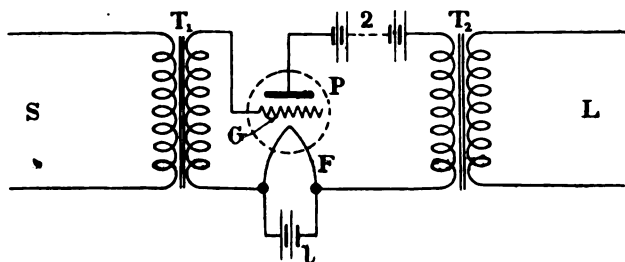


Fig. 4.

a donné toute satisfaction en assurant une bonne communication, même lorsque la ligne téléphonique présente des défauts d'isolement (voir nos brevets n° 508 928 et n° 501 508).

» L'amplificateur considéré est un amplificateur à tubes à vide à trois électrodes.

» Ces tubes ont reçu de nombreuses applications dans ces dernières années ; ils se composent d'un filament F porté à l'incandescence par la pile 1 (fig. 4), d'une anode principale ou plaque P alimentée par la pile 2, d'une anode auxiliaire ou grille G, réalisée, par exemple, sous la forme d'un treillis métallique.

» L'émission d'électrons par le filament incandescent (effet Edison) rend l'espace plaque-filament conducteur pour un sens convenable de la source 2 (plaque positive par rapport au filament) et un courant circule alors dans le circuit de la source 2.

» L'électrode auxiliaire G est, en quelque sorte, une électrode de commande ou de contrôle qui, suivant que son potentiel est positif ou négatif par rapport au filament, réduit ou augmente

l'intensité du courant qui circule entre la plaque et le filament sous l'action de la pile 2.

» Le courant à amplifier provenant de la source S est amené par un transformateur T_1 entre la grille et le filament, et le courant amplifié est rendu par le transformateur T_2 dans la ligne L.

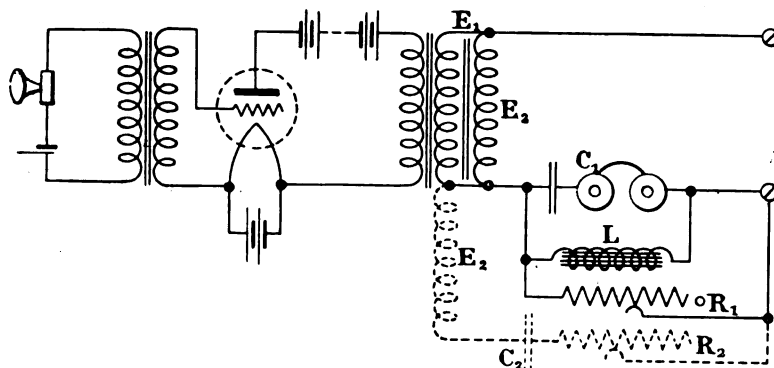


Fig. 5.

» Si on assimile le tube à une conduite d'eau, on peut dire que la grille remplit la fonction d'une vanne qui est alternativement fermée et ouverte par l'action du courant alternatif à amplifier (1).

» Dans l'application à la téléphonie sur lignes perturbées, la source S (fig. 5) est constituée par le microphone M et sa pile.

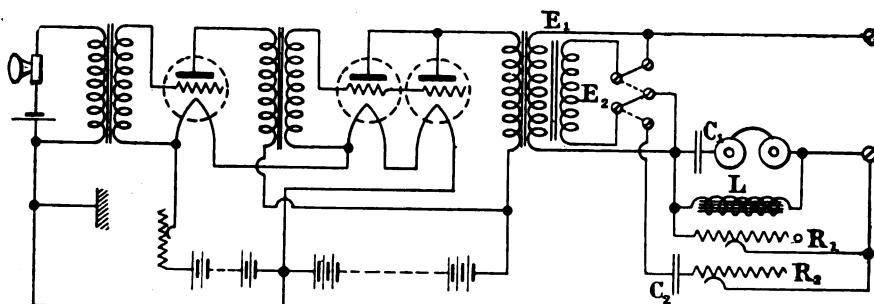


Fig. 6.

» L'amplificateur utilisé est à deux étages d'amplification et compte trois tubes à vide, les deux derniers étant montés en parallèle (fig. 6).

(1) Voir *Bulletin de la Société française des Electriciens* de juillet 1919.

» Le courant nécessaire au fonctionnement de l'amplificateur est fourni soit par des accumulateurs, soit par une dynamo comportant deux collecteurs, l'un à 14 volts, alimentant le circuit de chauffage des tubes à vide et l'autre, à 120 volts, le circuit plaque ; cette dynamo est entraînée par un moteur alternatif (monophasé ou triphasé).

» Le dispositif adopté pour ramener l'audition à sa valeur normale est le suivant :

Le récepteur est placé en série sur la ligne, avec un condensateur C_1 et l'ensemble ainsi constitué est shunté par une self-inductance L à entrefer réglable et une résistance R_1 . La self-inductance L crée une dérivation pour les perturbations dont la fréquence est inférieure à celle de la fréquence téléphonique ; elle a, pour ces basses fréquences, une impédance bien inférieure à celle correspondant à la fréquence du courant téléphonique.

» Le condensateur C_1 se comporte de la même façon, mais en sens inverse, car il oppose, au passage du courant perturbateur de basse fréquence, une impédance plus grande que celle correspondant à la fréquence téléphonique.

» En cas de perturbations très violentes, on a prévu une résistance R_1 (fig. 5) shuntant tout l'ensemble. On arrive pratiquement à shunter deux récepteurs ordinaires série par une résistance de 5 à 10 ohms, et l'on conçoit que les courants perturbateurs qui traversent le téléphone soient alors négligeables.

» Le rhéostat R_1 comporte un plot mort ; lorsque le curseur est placé sur ce plot, le rhéostat R_1 est coupé et le récepteur ne se trouve plus shunté par le rhéostat.

» Dans le but d'éliminer l'amorçage d'un courant téléphonique provoqué par la réaction entre le microphone et le récepteur, celui-ci est placé entre des points équipotentiels. Ceci est réalisé en plaçant un second enroulement secondaire E_2 en série avec le premier E_1 et en intercalant une ligne artificielle C_2R_2 ayant une impédance égale à celle de la ligne réelle ; le récepteur est alors branché entre le point milieu des deux enroulements secondaires E_1 , E_2 et entre la ligne réelle et la ligne artificielle. En faisant varier la ligne artificielle, on arrive à équilibrer la ligne réelle et à supprimer entièrement le sifflement dit « effet Larsen ».

» Les deux seules connexions à effectuer pour réaliser ce montage sont indiquées en trait pointillé sur le schéma de principe (fig. 6).

II

L'idée de moduler un courant à haute fréquence expédié sur une ligne quelconque de transmission pour effectuer la télégraphie ou la téléphonie à haute fréquence a été exprimée par M. Leblanc (voir *Lumière électrique*, 1886, et brevets français n^{os} 215 901 et 234 785 de 1891 et 1893). M. Turpain (voir *Revue de Physique*, livraison d'août 1900) a introduit, dans cette trans-

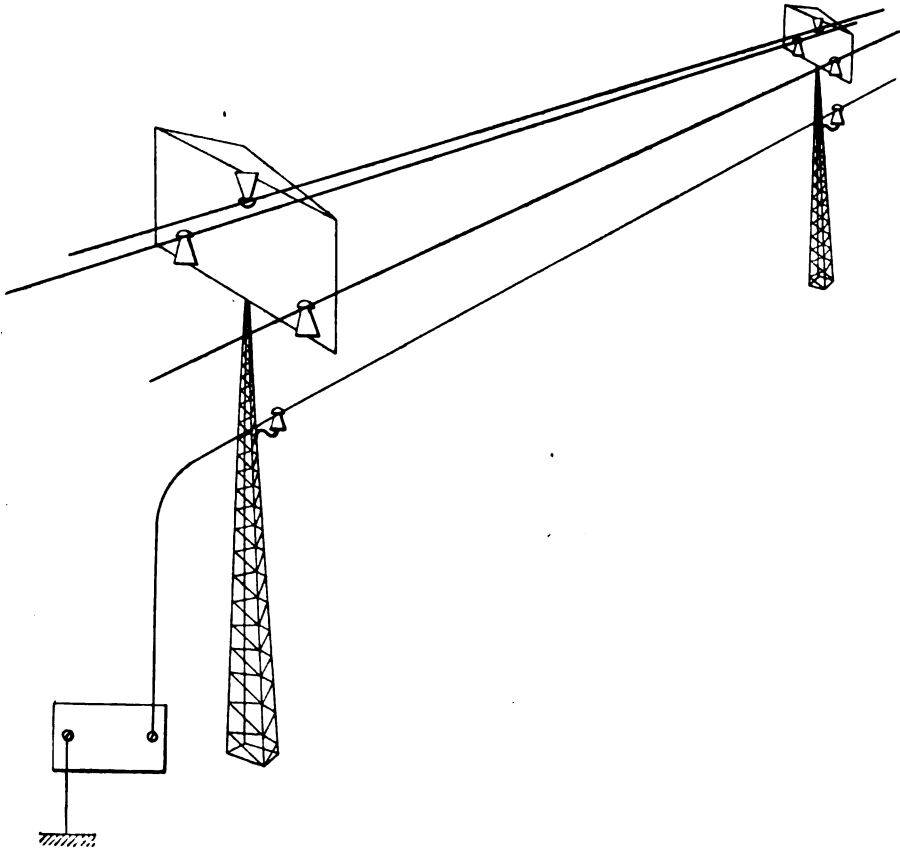


Fig. 7.

mission à haute fréquence, la détection habituelle à la télégraphie et à la téléphonie sans fil. Enfin, M. Neu (voir *Rapports du Congrès de Marseille* 1908, tome II, p. 454 et brevet n^o 355 442 de 1905) a proposé nettement l'utilisation des courants à haute fréquence pour la transmission des signaux sur les lignes mêmes de transmission d'énergie à haute tension. On ne saurait donc assez insister sur ce point que l'utilisation des courants à haute fré-

quence pour la transmission des signaux sur des circuits à fil, quoique ayant déjà reçu de nombreuses applications à l'étranger, est une invention véritablement française.

» Il existe une certaine tendance à faire rentrer ce genre de communications dans le domaine de la télégraphie sans fil par suite du fait que le genre d'appareils employés avec ce système de transmission, aussi bien à l'émission qu'à la réception, est

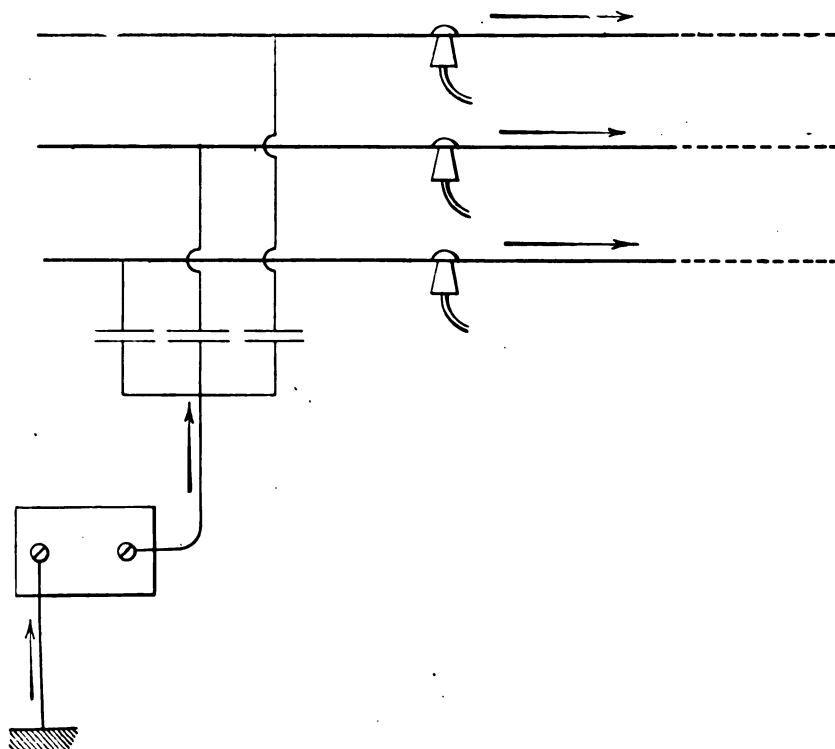


Fig. 8.

semblable à celui des appareils de la télégraphie et de la téléphonie sans fil proprement dite. Mais il y a là une erreur manifeste, puisque les transmissions à haute fréquence étaient proposées antérieurement à l'existence même de la télégraphie et de la téléphonie sans fil et que c'est la suppression de toute ligne de transmission qui a fait précisément la nouveauté de la télégraphie et de la téléphonie sans fil.

» Dans la transmission à haute fréquence, une des questions importantes est le mode d'attaque de la ligne.

» On peut attaquer la ligne soit par des conducteurs parallèles, soit par des capacités, soit par des transformateurs.

» Les conducteurs parallèles (fig. 7), que, par analogie avec la télégraphie sans fil, on appelle des « antennes », exercent une induction sur les conducteurs de la ligne de transmission d'énergie et inversement. Cette induction est à la fois de nature électrostatique et de nature électrodynamique. Ce n'est pas la capacité des conducteurs parallèles par rapport à la terre qui intervient ici, comme dans le cas des antennes de télégraphie sans fil, mais bien la capacité de ces conducteurs parallèles par rapport à la nappe des conducteurs de la ligne à haute tension. Pour une longueur de 200 mètres et une distance de 1 mètre de la nappe, cette capacité atteint une valeur de l'ordre du millième de microfarad. L'induc-

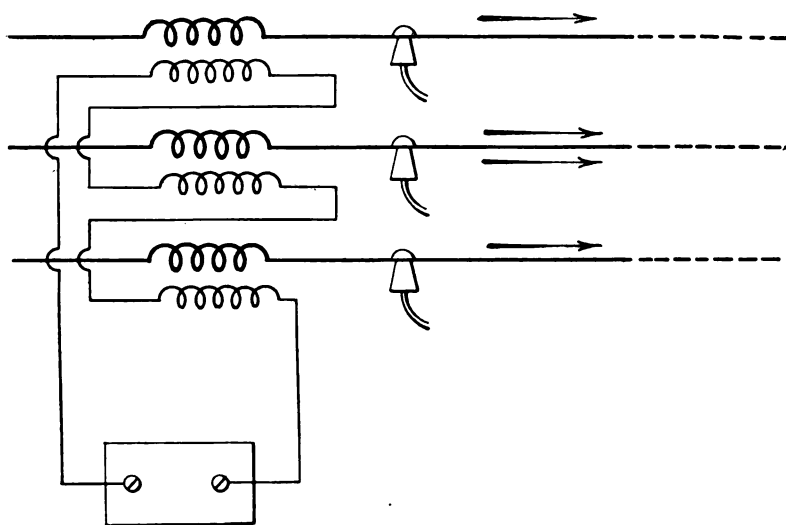


Fig. 9.

tion mutuelle électrodynamique entre les conducteurs parallèles et la nappe des conducteurs de la ligne de transmission peut atteindre, dans ces mêmes conditions, des valeurs de l'ordre du demi millihenry. Ces valeurs précisent bien qu'il s'agit d'un couplage entre les conducteurs parallèles et la ligne de transmission.

» Au lieu de disposer des conducteurs parallèles, on réalise des couplages équivalents avec des capacités ou avec des transformateurs à haute fréquence comme représenté sur les figures 8 et 9.

» On peut même, dans certains cas, utiliser les bobines de protection des centrales pour réaliser le couplage recherché (fig. 10).

» L'avantage d'une attaque par capacités ou par transformateurs est qu'elle permet de prendre deux conducteurs séparés pour

la transmission téléphonique, au lieu de la nappe de conducteurs et la terre (fig. 11). Les troubles apportés par la réception des

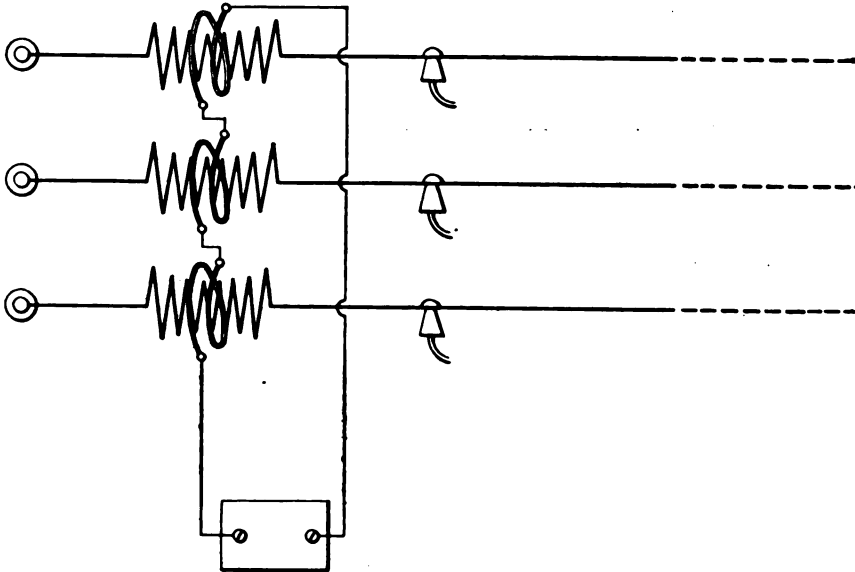


Fig. 10.

postes de télégraphie sans fil, ainsi que par les décharges provenant des effluves, sont réduits dans ce montage parce que la sur-

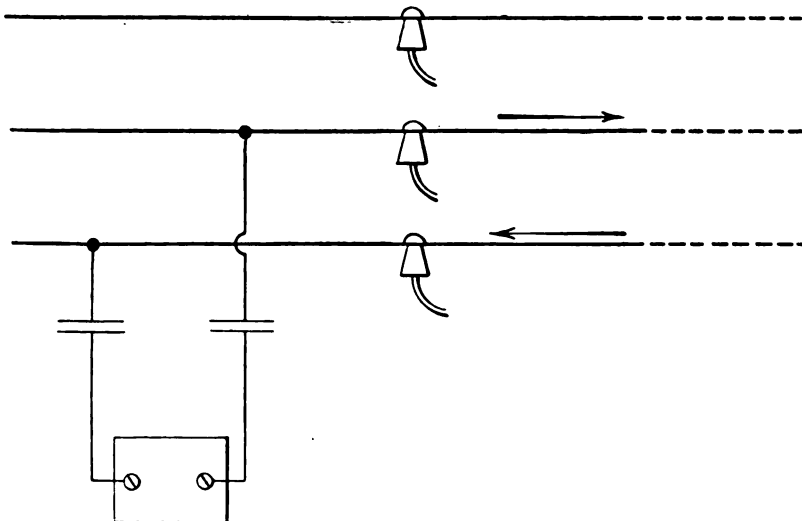


Fig. 11.

face offerte pour la réception de tout champ électrique extérieur est considérablement réduite. On réduit de même le rayonnement

et la transmission extérieure provenant des courants à haute fréquence circulant dans la ligne de transmission d'énergie.

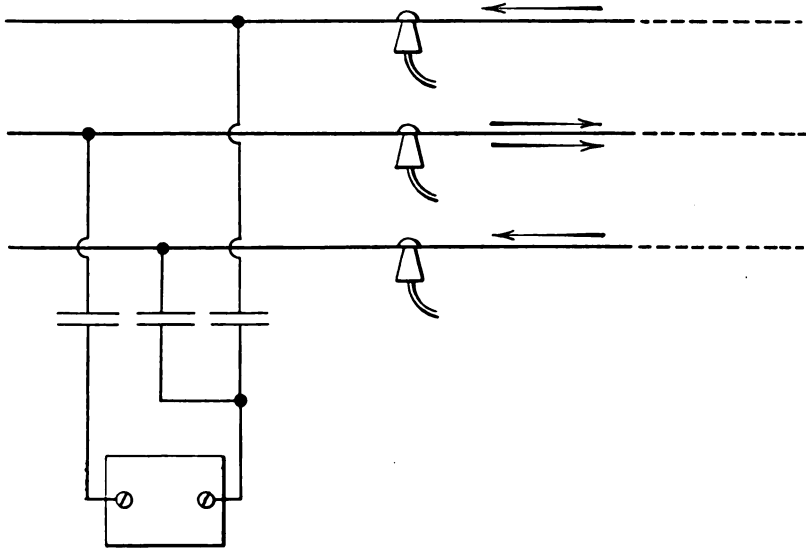


Fig. 12.

» Nous avons d'ailleurs imaginé un dispositif de compensation absolue en utilisant un conducteur pour l'aller et deux conduc-

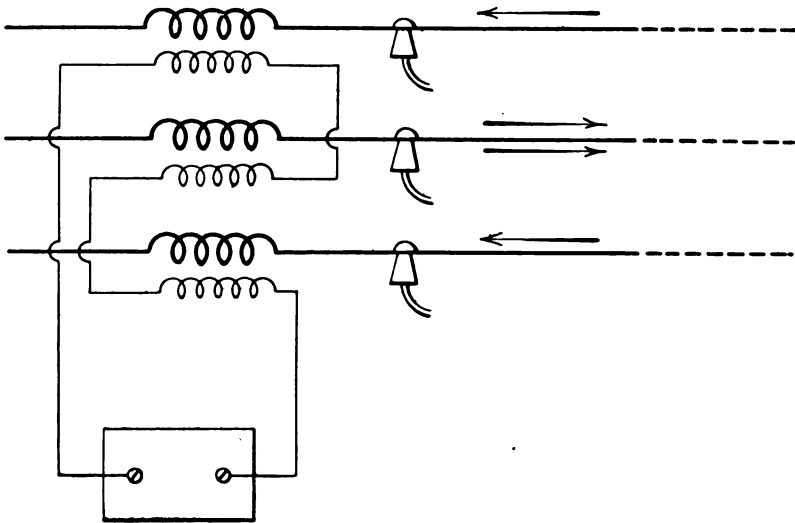


Fig. 13.

teurs pour le retour soit avec des capacités, soit avec des transformateurs, comme il est représenté sur les figures 12 et 13.

» Le fonctionnement en duplex se réalise en faisant travailler les deux postes correspondants sur des fréquences ou des longueurs d'onde différentes et en faisant éventuellement usage d'une

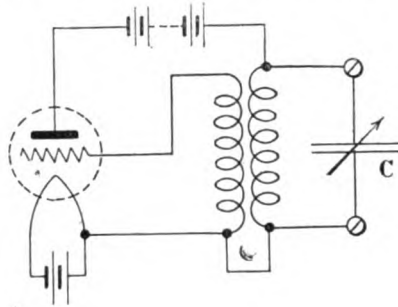


Fig. 14.

ligne artificielle équilibrant la ligne réelle. On introduit ainsi, dans le domaine de la haute fréquence, le montage prévu dans le domaine des amplificateurs téléphoniques pour éviter la réception de sa propre émission, suivant ce qui a été dit précédemment.

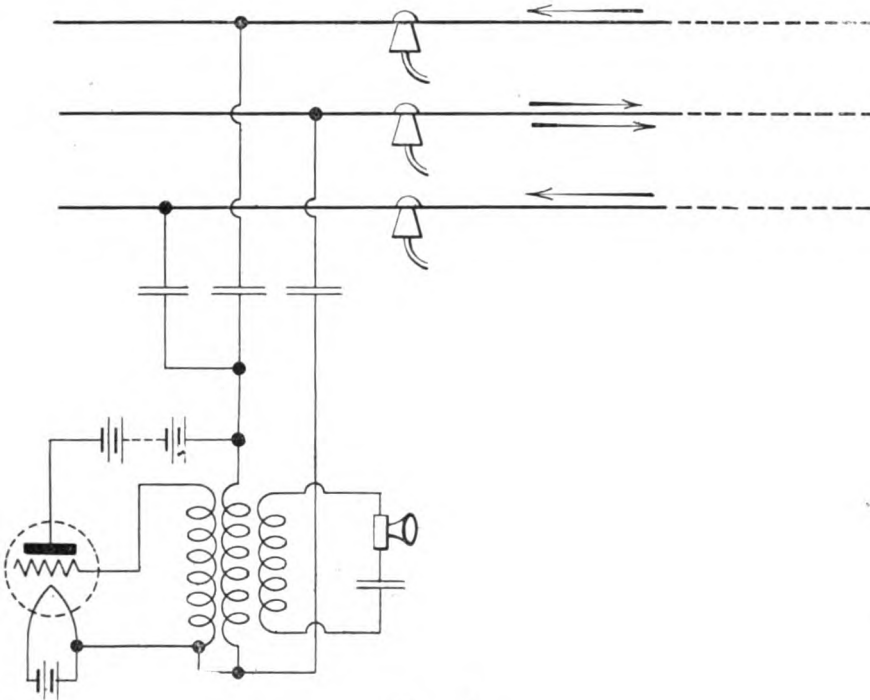


Fig. 15.

» Dans le cas de conducteurs parallèles, on peut en établir un pour l'émission et un autre pour la réception.

» La production des courants à haute fréquence se fait généralement avec des tubes à trois électrodes étudiés plus haut comme amplificateurs, grâce au montage de MM. Meissner (brevet n° 437 747). C'est l'apparition de ce moyen pratique d'obtenir des oscillations qui a déterminé la mise en œuvre des idées exprimées autrefois par MM. Leblanc, Turpain et Neu. La figure 14 reproduit le montage en question. C'est la réaction du circuit-plaque sur le circuit-grille du tube qui provoque les oscillations, dont la fréquence est déterminée par la valeur de la capacité du condensateur C, à la façon dont un microphone engendre un courant téléphonique devant un écouteur avec lequel il est électriquement connecté (effet Larsen).

» Le passage de l'amplification des courants périodiques à la génération propre d'oscillations dans le cas des tubes électroniques correspond au passage de l'excitation séparée à l'auto-excitation dans les machines à collecteur. (')

» L'action du microphone se produit suivant les montages habituels dans des postes de téléphonie sans fil avec tubes électroniques. La figure 15 représente un montage connu, dit par absorption, suivant lequel l'intensité des oscillations varie en raison de la résistance du microphone qui tend à amortir les oscillations.

» Les appels peuvent être sélectifs. Chaque poste installe sa réception sur une fréquence propre et est, par ailleurs, capable d'émettre, pour les appeler, toutes les fréquences ou longueurs d'onde des postes correspondants.

RÉSUMÉ

» Il y a deux systèmes possibles de communication pratique entre les centrales des lignes à haute tension qui comportent chacun l'utilisation des tubes électroniques.

» Dans le cas où il existe des lignes téléphoniques déjà posées, on emploiera des amplificateurs avec tubes. Dans le cas où la ligne téléphonique reste à poser, on envisagera l'utilisation de ces tubes comme générateurs de courants à haute fréquence pour réaliser la téléphonie à haute fréquence par la ligne de transmission elle-même.

M. le PRÉSIDENT remercie M. Marius Latour.

(') Voir notre article dans *The Electrical World*, 30 octobre 1920.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

Changement de fréquence des machines électriques,

par D. W. Proebstel et E. H. Le Tourneau (Amer. Inst. Elect. Eng. mars 1920)

A Portland, Orégon (E. U.), certaines circonstances locales nécessitèrent la transformation de diverses unités d'une installation à 33 p.s., afin de les faire fonctionner sur un circuit à 60 p.s. L'une des machines à transformer était une turbogénératrice bipolaire, marchant à 1 980 t.mn. L'un des pôles existants fut inversé, ce qui produisit deux pôles intermédiaires de polarité contraire à celle des pôles bobinés. Toutefois, des bobines de compensation durent être ajoutées aux extrémités du rotor, pour contrarier le flux axial causé par les dispersions de flux chez les tours extrêmes du rotor. La vitesse fut réduite à 1 800 t.mn, et l'enroulement du stator à circuit double relié en étoile fut reconnecté de manière à former un enroulement à circuit simple relié en étoile. Cela s'opéra sans enlever les bobines des encoches. On éprouva d'ailleurs beaucoup de difficultés dues à la rupture d'équilibre des nouvelles bobines de compensation, et des tâtonnements sans nombre furent nécessaires avant d'obtenir pour celles-ci des caractéristiques électriques satisfaisantes. Plusieurs commutatrices furent de même reconstruites en vue du changement de fréquence. Les 12 pôles primitifs furent enlevés et remplacés par 18 nouveaux pôles, après réalésage du bâti ; enfin, la vitesse fut portée de 300 à 400 t.mn. Dans ce dernier cas, les bobines furent enlevées des encoches, isolées à nouveau, et reconnectées à un pas différent, et de nouvelles connexions furent effectuées sur les bagues collectrices. Les changements nécessaires furent également apportés aux bagues des balais. Naturellement, on procéda à des essais étendus avant de mettre les machines en service.

Traction à vapeur contre traction électrique,

par A. H. Armstrong (Amer. Inst. Elect. Eng., mars 1920)

Cette communication a un peu le caractère d'une polémique, et elle met en parallèle les résultats dont la traction électrique serait susceptible, avec ceux réellement obtenus par la traction à vapeur pendant l'hiver 1917-1918, aux Etats-Unis. L'auteur prétend que, sans tenir compte des développements apportés dans le domaine de l'hydraulique, les deux tiers de la houille employée par la traction à vapeur pourraient être économisés et que, dans le cas des Etats-Unis, cette économie équivaldrait à deux fois le montant total du charbon employé en France pour les chemins de fer et l'industrie, et excéderait de 50 pour 100 le total de ce qu'exportait la Grande-Bretagne avant la guerre. Les arguments produits en faveur de la traction électrique sont d'un caractère différent, et nombre de références sont fournies à cet égard, lesquelles proviennent tant des Etats-Unis que de l'étranger.

Détection des sous-marins dans un champ magnétique alternatif,

par J. B. Whitehead et L. O. Grondahl (Amer. Inst. Elect., avril 1920)

Ce mémoire décrit une série d'expériences relatives à la perturbation causée dans un champ magnétique alternatif par la présence d'une masse magnétique, et cela dans le but d'obtenir un dispositif propre à la détection des sous-marins. Des essais de laboratoire, portant sur des modèles de sous-marins de 3 m de long, furent reconnus concordants avec la théorie, et susceptibles de servir de base pour l'étude d'équipements plus vastes. Des expériences de détection furent effectuées sur des coques d'acier au moyen d'un équipement installé sur un chasseur de sous-marins en bois de 33 m de long ; elles concordèrent bien avec les essais de laboratoire. En eau calme, en utilisant un équipement du poids d'environ 3 600 kg, il serait possible de découvrir un sous-marin de 60 m de long à une distance de 150 m ; mais la sécurité du système de détection est troublée par le mouvement du navire (dû à ses machines), par la houle, et par les changements de route ou de vitesse.

Oscillateur audion,

par R. A. Heising (Amer. Inst. Elect. Eng., avril et mai 1920)

Il est traité ici de la théorie et du fonctionnement des circuits d'oscillateurs audions. Les rapports de phases des divers circuits, la fréquence des oscillations engendrées et la conduite générale des oscillateurs sont traités comme dépendant des variables en jeu. Certains circuits complexes sont simplifiés, et des diagrammes vecteurs donnent les rapports de phases de plusieurs circuits simples. La similarité des circuits compliqués et des circuits simples est démontrée par l'auteur, qui donne ensuite la manière de déterminer le mode de fonctionnement de ces circuits compliqués en les ramenant à des circuits simples. La conduite d'un oscillateur, lorsque les six variables indépendantes du circuit sont modifiées, est expliquée par une série de courbes, et une méthode permettant d'ajuster rapidement et facilement un circuit, pour sa condition de travail propre, est indiquée par les courbes. Le problème qui consiste à assurer un rendement élevé est également discuté, et les conditions requises à cet effet sont exposées.

Une méthode de mesure par enregistrement direct de la distribution du flux magnétique,

par F. S. Dellenbaugh, Jr (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1920)

Pour trouver le flux magnétique « in situ », on recourt à un induit de 5.5 mm de diamètre et de 100 mm de long, avec barres de commutation en or. L'induit est actionné par un petit moteur à courant continu dont la vitesse est maintenue constante, à 0,1 pour 100 près, au moyen d'un régulateur. La tension engendrée qui, pour une vitesse donnée de l'induit, est proportionnelle au flux, se mesure au moyen d'un millivoltmètre du type à réflexion. La distribution du flux sur une section du champ magnétique s'obtient par l'emploi d'une méthode d'enregistrement photographique combinée avec un mécanisme propre à faire mouvoir l'induit dans le champ. Il est possible ainsi d'explorer un champ magnétique beaucoup plus rapidement que par les méthodes balistiques. Divers enregistrements de la distribution du champ entre les inducteurs et le stator d'un alternateur figurent dans le mémoire.

Distribution de flux dans les noyaux des turboalternateurs,

par C. J. Fehchheimer (Amer. Inst. Elect. Eng., juillet 1920)

L'auteur a étudié la distribution du flux dans le stator d'un turboalternateur à ventilation axiale, en plaçant des conducteurs de recherche dans les canaux de ventilation et en déterminant les tensions produites dans ceux-ci, au moyen de voltmètres et d'oscillographes. Un nombre considérable d'oscillogrammes ainsi obtenus sont reproduits dans le mémoire. Quelques points curieux sont signalés quant à la légère dyssymétrie produite : ainsi, quoique les flux doivent atteindre leurs maxima le long des mêmes lignes radiales et, au même instant, à toutes les épaisseurs du noyau, ils ne sont pas à zéro le long de la même ligne radiale et à toutes les épaisseurs en même temps. Des courbes donnant les densités de flux aux diverses épaisseurs, sont reproduites. Ces courbes ont surtout pour intérêt de montrer que la variation de densité avec l'épaisseur est relativement faible, même aux tensions réduites bien au-dessous de la saturation. L'auteur expose une méthode approximative d'estimation du total d'ampères-tours nécessaires pour produire un certain flux dans le noyau, en tenant compte de la distribution dans le noyau, telle que révélée par les présentes recherches. Le fait que, pour le type de turboalternateur à encoches radiales, les pertes dans le noyau, par kilogramme de matière, sont considérablement moindres que pour les alternateurs à pôles saillants — tout en étant plus grandes que pour les transformateurs — serait dû à ce que l'amplitude de variation de densité du flux est beaucoup moindre dans le premier cas que dans le second. Une autre cause peut être attribuée au moindre pourcentage de perte dans le fer, dans les dents du stator, par suite de la grande épaisseur du noyau, au regard des proportions générales que présentent les alternateurs à pôles saillants.

Oscillographe portatif,

Par J.-W. Legg (Amer. Inst. Elect. Eng., juillet 1920)

L'auteur décrit une forme spéciale d'équipement complet d'oscillographe portatif, qui peut être installé rapidement et partout, et n'est pas tributaire d'une distribution à courant continu. La source lumineuse est constituée par une lampe à incandescence à atmosphère gazeuse qui, en ordre de fonctionnement, est un peu poussée. Cette lampe, ainsi que le moteur de film, sont normalement actionnés sur un circuit à courant alternatif (genre de distribution le plus fréquemment utilisable aux États-Unis). Des tensions de 110 ou 120 volts, à toutes fréquences comprises entre 20 et 70 p.s, peuvent être employées, et la puissance nécessaire est moindre de 300 watts. Il est facile de substituer au moteur à courant alternatif un moteur à courant continu. Le circuit de champ du galvanomètre absorbe que 10 watts, et il est alimenté par une petite batterie d'accumulateurs. Le galvanomètre comporte trois vibrateurs distincts, traversés en série par le flux. Les résistances nécessaires sont disposées sous une forme très compacte. A signaler, entre autres caractéristiques de l'instrument, un système de volet qui, actionné mécaniquement, assure que l'exposition du film débute exactement au commencement de celui-ci, ce dispositif étant combiné avec un interrupteur à déclat, afin d'empêcher que la tension anormale employée pour accroître l'éclat de la lampe ne soit appliquée que le temps strictement nécessaire. Une autre caractéristique consiste en un interrupteur commandé à distance, permettant de faire apparaître un phénomène transitoire, à volonté, sur telle partie du film. L'ensemble de l'appareil pèse une soixantaine de kgs répartis sur deux unités. L'ensemble de l'appareil pèse une soixantaine de kilogrammes répartis sur deux unités.

La perte par surface considérée comme un facteur intervenant dans le calcul des isolateurs,

Par T.-M. Feder (Amer. Inst. Elect. Eng. ; septembre 1920)

L'auteur expose une étude théorique de la résistance à la perte par surface d'un isolateur. Celle-ci peut s'exprimer par une intégrale, mais seulement dans le cas de surfaces mathématiques, et non lorsqu'il s'agit des formes ordinairement employées dans la pratique. Une des méthodes propres à diminuer la perte par surface implique une augmentation de diamètre; elle est d'une valeur économique discutable. L'autre méthode consiste dans l'emploi de surfaces cannelées, et c'est la plus répandue. Les cannelures doivent être assez grosses pour résister aux chocs ou arcs. Les cannelures profondes, étant faibles mécaniquement, doivent être évitées. Avec un isolateur bien calculé, le corps de celui-ci se prête au passage du flux diélectrique, et l'effort électrostatique, étant tangentiel, tend à rejeter toutes les particules de matière étrangère qui, sans cela, pourraient former un trajet conducteur. Ainsi, la surface est maintenue propre, mais il n'en est ainsi que pour un isolateur à l'état sec.

Etude économique d'un système de distribution secondaire,

Par P.-O. Reyneau et H.-P. Seelye (Amer. Inst. Elect. Eng., octobre 1920)

Les auteurs traitent du cas, commun en Amérique, où un réseau de distribution secondaire à fils nus, est alimenté par des transformateurs de dimensions modérées, espacés à intervalles égaux dans tout le réseau, et leur but est d'établir une méthode propre à déterminer les valeurs les plus économiques des variables suivantes : dimension du fil, format du transformateur et espacement entre transformateurs. Des données sont fournies quant aux frais annuels des transformateurs, en admettant certains rapports entre les pertes dans le cuivre et dans le fer correspondant à un facteur de charge probable, frais auxquels sont ajoutés les frais de lignes par 1 000 pieds (305 m) installés, pour obtenir le total des frais de distribution. Une limite de chute de tension de 3 pour 100 est admise et des rapports sont établis entre l'espacement des transformateurs le plus économique, la dimension du fil et le format des transformateurs. Des équations et des courbes sont d'abord fournies en partant d'un point de vue théorique, puis une série de courbes est dressée dans un but pratique, eu égard aux dimensions réelles standard des fils et des transformateurs. Un exemple est pris pour montrer l'application de la méthode ainsi que les limites de son emploi.

BIBLIOGRAPHIE

Dictionnaire juridique de l'industrie électrique, par Etienne Carpentier, Avocat à la Cour d'Appel de Paris, Docteur en droit ès sciences juridiques et ès sciences politiques et économiques. — 2^e édition augmentée d'un appendice. 1 vol. 25 cm × 16 cm de IX-439 pages, avec tableaux, Paris : Dunod, 1920.

Ce recueil, dû à un juriste notaire, est surtout destiné aux électriciens, ou pour mieux dire, à tous ceux qui, à un titre quelconque, appartiennent à l'industrie électrique ou en sont titulaires : administrateurs ou chefs d'entreprises, techniciens, ouvriers même. Ils y trouveront, sous forme de dictionnaire, un répertoire aussi complet que possible des dispositions législatives ou réglementaires, ainsi que les décisions judiciaires les plus intéressantes, ce qui leur permettra de résoudre, aisément et rapidement, toute difficulté juridique avec laquelle ils peuvent être aux prises.

L'ouvrage comprend deux parties distinctes : 1^o une partie alphabétique, où figure la jurisprudence sous les rubriques appropriées, avec tous renvois utiles; 2^o une partie chronologique réservée aux règlements et décrets en vigueur depuis juin 1906 (époque où fut promulguée la Loi sur les Distributions d'énergie). Mais l'auteur s'est gardé d'alourdir cette dernière partie en y insérant les règlements d'ordre secondaire et, en fait de circulaires et d'instructions, il n'a retenu que celles susceptibles d'offrir un certain intérêt pour les particuliers.

Ainsi conçu, et publié sous une forme typographique excellente, l'ouvrage de M. E. Carpentier — dont cette 2^e édition comporte un supplément important — sera certainement accueilli avec faveur dans les centres industriels.

IL Y A TRENTE ANS

Rayonnement de la chaleur par la surface des machines dynamos électriques (M. Rehniewski). — Premières applications des tramways électriques à Paris (M. Frank Gerald).

Le Gérant : J. Guyot.

Imp. Denrol, 20, rue Gerbert, Paris.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de l'Assemblée générale annuelle et de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 5 avril 1922 : Admission de membres titulaires, p. 153. — Membres décédés, p. 154. — Dons à la Société, p. 154. — Rapport de la Commission des comptes (M. LOCHERER), p. 155. — Rapport du Comité (M. MAURICE LEBLANC, Secrétaire général), p. 160. — Rapport sur le Laboratoire central et l'Ecole supérieure d'Electricité (M. PAUL JANET), p. 163. — Théorie de la dynamo à trois balais (M. BETHENOD), p. 175. — Remarque sur la communication de M. Bethenod (M. IGLÉSI), p. 183. — Résultat des élections : Renouvellement partiel des membres du Bureau, du Comité et de la Commission des comptes ; élection d'un membre d'honneur, p. 188. — Allocution de M. JEAN REY, Président sortant, p. 190. — Dispositif applicable à tous systèmes de compteurs électriques en vue d'une tarification variable suivant l'heure et la consommation (M. MAHL), p. 195. — Remarques sur la communication de M. LANGEVIN (MM. ABRAHAM, BRYLINSKI, BERTHELOT), p. 201.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 218.

BIBLIOGRAPHIE, p. 220.

IL Y A TRENTE ANS, p. 224.

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE

ET DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 avril 1922. (1)

Présidence de M. JEAN REY.

La séance est ouverte à 20 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

- Brugnon** (Roger-Fernand), Elève à l'E. S. E., 29, rue de Lourmel, à Paris. Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Delalande** (André-Désiré-Georges), Sous-directeur de la Cie pour la fabrication des Compteurs et Matériel d'usines à gaz, 9, rue de Bagneux, à Paris (6°). Présenté par MM. Grassot et Ilkovic.
- Golze** (François), Elève à l'E. S. E., 54, boulevard Garibaldi, Paris (15°). Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Gottraux** (André-Maurice), Directeur de la Métallurgie électrique, 15, rue Chaptal, à Levallois-Perret (Seine). Présenté par MM. Dussaix et Vedovelli.
- Lyon** (Roger-Marie-Louis-Ferdinand), Ingénieur électricien E. S. E., Ingénieur du Génie rural, 37, rue du Parc, à Fontenay-sous-Bois (Seine). Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Marle** (Charles-Aimé), Chef des travaux de physiques et d'électrochimie à la Faculté des Sciences (Institut de Chimie appliquée), 9, rue de Bagneux, à Paris (6°). Présenté par MM. Bunet et Saget.
- Martin** (Jean-Yves), Ingénieur A. et M., Elève à l'E. S. E., 8, rue Edme-Guillout, à Paris (15°). Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Rogier** (Marcel-Louis), Mobilisé au 1^{er} régiment du Génie, 17, avenue Colonel-Bonnet, à Paris (16°). Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Rumilly** (Jean-Louis-Antoine), Mobilisé au 1^{er} régiment du Génie, 9, rue du Lieutenant-Colonel Prévôt, à Lyon (Rhône). Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.
- Vaubousson** (Robert), Ingénieur à la Maison Da et Dutilh, 42, rue Jules-Vallès, à Paris (13°). Présenté par MM. Da et Dutilh.
- Weintraub** (Ezechiel), Ingénieur-conseil, 31, rue Charles-Lafitte, à Neuilly-sur-Seine (Seine). Présenté par MM. Marius Latour et Maurice Leblanc fils.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Armengaud Jules, Barré, Gatehouse, Leclanché, Moréno*. Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part des dons suivants :

Ecole, chaire d'électrotechnique générale :

Union d'Electricité	1 000 francs
Etablissements Sautter-Harlé	4 000 »

Il adresse à ces donateurs les remerciements de la Société.

M. le PRÉSIDENT invite les sociétaires qui n'ont pas encore voté à venir déposer dans l'urne leur bulletin de vote pour le renouvellement partiel du Bureau, du Comité et de la Commission des comptes, ainsi que pour l'élection d'un membre d'honneur. A cet effet, la séance est suspendue pendant quelques minutes et deux bureaux de scrutin sont constitués. A la reprise, il est donné suite à l'ordre du jour.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES POUR L'EXERCICE 1921

M. Locherer, au nom de la Commission des Comptes, fait, sur les opérations financières de la Société pendant l'exercice 1921, un rapport verbal portant successivement sur chacun des services, et, dans ces services, sur chacun des articles et sous-articles de recette et de dépense. Il appelle l'attention de l'Assemblée sur les différentes observations que suggère cet examen de détail, constate le développement continu et satisfaisant que révèlent les chiffres d'ensemble et finalement propose l'approbation des Situation et Bilan ci-après (pages 156 à 159).

En proposant d'approuver les comptes de l'année 1921, la Commission des Comptes se fait un devoir de rendre témoignage au dévouement et aux qualités de précision et de régularité dont M. Dellons, trésorier suppléant, n'a pas cessé de faire preuve au cours du dernier exercice.

Ce rapport est adopté à l'unanimité.

SITUATION FINANCIÈRE

COMPTES DE L'EXERCICE 1921

RECETTES

Cotisations libérées.....	fr 2 050,50
Cotisations de l'exercice.....	56 125,00
Intérêts des fonds placés.....	18 209,95
Produit du bulletin.....fr ..	12 613,30
Intérêts du legs Hughes.....	2 135,00
Réserve.....	54,35
Intérêts du legs Cheux.....	1 882,00
Réserve.....	12,80
Intérêts de la Fondation Joubert.....	310,50
Réserve.....	155,40
Intérêts de la Fondation Cohen.....	250,00
Réserve.....	11,55
Intérêts de la Fondation Guyau.....	4 200,00
Réserve.....	1 800,00
Souscriptions Travaux publics.....	100 000,00
Souscriptions Sartiaux.....	19 535,00
— diverses.....	15 400,00
Participation de l'Ecole à la subvention du Laboratoire.....	
Chaire électrotechnique	10 000,00
Profits et pertes.....	7 500,00
	2 859,55

Arrangements de la rente.....	7 903,00
Redevances pour essais et étalonnements.....	171 960,07
Redevances des Elèves et Tiers.....	987,25
Subvention de la Société.....	110 163,84
Amortissement de la Marine : fr	
Constructions	2 853,25

DÉPENSES

I. — Services généraux.

Frais de publications.....	fr 16 690,47
Frais de réunions.....	1 679,00
Personnel.....	37 445,25
Frais d'administration.....	5 509,67
Entretien de la bibliothèque.....	180,50
Frais de correspondance.....	3 455,75
Comité électrotechnique et divers.....	4 400,00
Intérêts de la Bourse	fr
Hughes.....	750,00
Réserve.....	1 439,35
Intérêts de la Bourse Cheux.....	1 894,80
Réserve.....	»
Intérêts de la Fondation Joubert.....	310,50
Réserve.....	155,40
Intérêts de la Fondation Cohen.....	261,55
Réserve.....	»
Intérêts de la Fondation Guyau.....	4 800,00
Réserve.....	1 200,00
Cotisations irrécouvrables.....	14 856,50
Chaire d'électrotechnique.....	7 500,00
Subventions au Laboratoire.....	110 163,84
PlACEMENT AU FONDS DE RÉSERVE :	fr
Cotisations libérées.....	2 050,50
1/10 ^e des revenus.....	3 190,00
Solde créditeur.....	255 104,90

II. — Laboratoire

Personnel.....	fr 151 690,90
Frais d'administration :	
Frais de bureau, etc.....	6 013,55
Coke et gaz.....	12 850,35
Eau, électricité.....	2 993,25
Téléphone.....	1 227,25
Opérations et essais taxés :	

Matériel 14 860,20 17 713,55
Profits et pertes.....aux dépenses
308 729,71

Machines à vapeur, moteurs, etc.
Produits 45 390,25
Atelier..... 7 248,20
Déplacements du personnel.... 655,15
Loyers, impôts, assurances..... 2 071,70
Entretien des bâtiments.. 1 268,25
Entretien des machines et appareils 18 008,75
Expériences et recherches..... 4 985,90
Acquisition d'instruments etc..... 2 421,15
Amortissement de la Marine..... 31 164,65
Profits et pertes 17 713,55
308 729,71

III. — Ecole.

Redevances des Elèves et Auditeurs
Frais d'études..... 610 477,45
Fournitures diverses..... 26 981,50
Souscriptions..... 54 000,00
Intérêts des fonds placés..... 13 689,85
Subvention de la Ville de Paris... 2 000,00
Radiotélégraphie :
Frais études.....
Subvention..... 82 775,00
Profits et pertes 7 235,95
797 159,75

Personnel 178 481,55
Frais d'administration :
Frais de bureau, correspondance. 16 154,55
Chauffage et éclairage..... 11 581,10
Travaux des Elèves :
Machine à vapeur, moteurs, etc.. 9 455,90
Produits et dépenses diverses.... 5 818,10
Atelier 9 130,95
Conférences, projets, etc..... 113 377,30
Fournitures diverses..... 18 935,70
Impôts, assurances..... 6 309,60
Entretien des bâtiments..... 12 308,00
Entretien des machines et appa-
reils..... 11 379,80
Location de salles..... 10 150,00
Participation à la subvention au La-
boratoire 10 000,00
Radiotélégraphie 50 657,20
Projet de reconstruction de l'école. 10 000,00
Acquisition d'instruments et de ma-
tériel..... 26 211,35
Fonds de réserve 30 017,65
Solde créditeur 267 191,00
797 159,75

RÉCAPITULATION

Services Généraux 255 104,90
Laboratoire 308 729,71
Ecole..... 797 159,75
1 360 994,36

1 360 994,36

1 360 994,36

BILAN AU 31 DÉCEMBRE 1921

I. — Services généraux.		PASSIF	
ACTIF			fr
Fonds de réserve (valeur au 31 décembre 1921) :		Cotisations anticipées.....	2 345,00
46 obl. P.-L.-M. 3 o/o.....	13 478,00	Créditeurs divers.....	13 795,60
8 obl. Est 3 o/o.....	2 392,00	Frais de publication.....	13 491,91
4 obl. Ouest-Algérien 3 %	1 042,00	Bourse Hughes. Intérêts.....	1 439,35
758 fr de rente 3 o/o.....	13 820,85	Fondation Joubert >	155,49
660 fr de rente 3 o/o. 1916.	10 586,40	Fondation Cheux >	1 864,80
290 fr de rente 4 o/o. 1918.	4 730,60	Fondation Cohen >	261,55
18 obl. Midi 3 %.....	4 943,60	Fondation Guyau >	1 200,00
Espèces.....	430,84	Fonds affectés au Laboratoire 230 044,66.	
Legs Hughes (valeur au 31 décembre 1921) :		34 769,16	264 813,82
1 500 fr de rente 3 o/o.....	27 350,00	Fonds avec affectation spéciale.....	300 184,23
675 fr de rente 5 o/o. 1916.	10 185,40		
Legs Cheux (valeur au 31 décembre 1921) :			
1 222 fr de rente 3 o/o.....	22 281,13		
660 fr de rente 5 o/o.....	10 586,40		
Fondation Joubert (valeur au 31 décembre 1921) :			
21 obl. P.-L.-M. 3 o/o.....	6 739,00		
Espèces.....	26,28		
Fondation Cohen (valeur au 31 décembre 1921) :			
250 fr de rente 4 o/o.....	4 037,50		
Fondation Guyau (valeur au 31 décembre 1921) :			
2 400 fr de rente 4 o/o. 1918	38 496,00		
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1921) :			
41 fr de rente 5 o/o.....	657,65		
2 710 fr de rente 4 o/o. 1918	44 206,85		
14 obl. Nord 3 o/o.....	4130,00		
30 obl. Etat 4 o/o.....	9 600,00		
40 obl. Orléans 4 o/o.....	12 580,00		
100 obl. Cr. National 1919.	46 400,00		
Bons "Défense Nationale" 180 868,25			
	298 442,75		469 574,75

Compte d'ordre.....		90 171,71
Caisse.....	10 904,99	
Crédit Lyonnais.....	49 978,73	
Brault.....	3 590,67	
Chèques postaux.....	3 673,65	
Cotisations à recevoir.....		68 142,04
Débiteurs divers.....		2 375,00
Bibliothèque.....		26,97
Mobilier.....		24 758,20
		1 900,00
		656 948,67

II. — *Laboratoire.*

Bibliothèque.....		2 975,40
Constructions.....	229 389,68	
—.....	2 277,00	
Instruments et matériel.....	231 666,68	
Caisse.....	428 052,24	
Débiteurs divers.....	185,16	
Cautionnement.....	41 636,34	
		640,00

705 155,82

III. — *Ecole.*

Instruments et matériel.....		276 294,65
Constructions.....	90 216,20	
—.....	2 745,50	
Fonds de réserve (valeur au 31 décembre 1921) :		92 961,70
10 obl. Orléans 4 o/o.....	3 145,00	
12 obl. Nord 3 o/o.....	3 540,00	
10 obl. Etat 4 o/o.....	3 200,00	
1 800 fr de rente 6 o/o.....	28 133,35	
Bons "Défense Nationale".....	30 000,00	
300 obl. sexennales Mai 23.....	30 017,65	
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1921) :		98 036,00
14 obl. Nord 3 o/o.....	4 130,00	
20 obl. Orléans 4 o/o.....	6 290,00	
Bons "Défense Nationale".....	220 000,00	
—.....	169 600,00	
1250 obl. sexennales Fév. 23.....	121 276,93	

Compte d'ordre.....	521 296,93
Caisse.....	34 978,35
Cautionnement.....	421,05
Débiteurs divers.....	143,35
	171 829,15

1 195 961,18

2 558 065,67

Créditeurs divers.....	42 461,50
Ministère de la Marine.....	109 169,65

151 631,15

Créditeurs divers.....	11 016,57
Redevances des Elèves pour 1922.....	134 687,50
Autographe 1922.....	30 743,80
Radiotélégraphie : fr.....	
Redevances des Elèves pour 1922.....	71 044,00
Réserve.....	37 678,35

285 170,22

RÉCAPITULATION

Services généraux. Excédent de l'actif...	336 764,44
Laboratoire.....	553 524,67
Ecole.....	910 790,96
	1 821 080,07
	2 558 065,67

RAPPORT DU COMITÉ D'ADMINISTRATION

M. Maurice LEBLANC, *Secrétaire général*. — « Messieurs, je vous parlerai d'abord de l'activité technique de la Société pendant l'année écoulée. Vous savez qu'elle peut être caractérisée par le travail des sections et par les communications faites au cours des séances mensuelles.

» Il m'est malheureusement impossible de vous présenter un tableau favorable de l'activité de nos sections, dont seules la deuxième s'est réunie régulièrement et la sixième un assez grand nombre de fois.

» A la deuxième section, qui s'occupe des questions d'éclairage, le président, M. Eschwege, et le secrétaire, M. Granat, ont réussi à réunir régulièrement autour d'eux une vingtaine de membres, parmi lesquels des représentants des compagnies de chemin de fer ou de grandes sociétés, et l'étude de sujets importants, tels que l'éclairage des grands espaces, celui des wagons de chemin de fer, des scènes de prises de films, etc, ont été abordés ; une visite a été faite en commun aux établissements Gaumont ; des programmes d'essais ont été établis et entamés ; des procès-verbaux des communications et des discussions en séance ont été régulièrement distribués. Ce résultat, fruit d'efforts de plusieurs années, montre qu'il est possible, avec de la persévérance, de donner aux sections de notre société une activité qui lui est indispensable. Certes, la deuxième section a devant elle un vaste programme de travail, puisque, en Amérique et en Angleterre, il existe des sociétés spéciales d'ingénieurs éclairagistes ; mais il n'existe pas non plus en France de sociétés savantes qui s'occupent spécialement d'électrochimie ou de télégraphie et, cependant, malgré l'importance de ces industries, nos sections correspondantes sont sans vie.

» La sixième section, que préside M. Joly, s'est réunie à diverses reprises pour entendre des communications de MM. Joly, Ilievici, Jouaust, etc, qui ont été ensuite présentées en séance publique.

» Bien que les sections n'aient guère alimenté les programmes de nos séances, ceux-ci ont pu être composés sans difficultés, ce qui prouve l'intérêt croissant que les techniciens trouvent à venir présenter à la tribune de notre Société le résultat de leurs tra-

vaux ; corrélativement, le nombre des auditeurs a été sensiblement plus élevé en moyenne que les années précédentes.

» Je vous rappellerai que nous avons eu le plaisir d'entendre cette année une série de communications : sur les appareils de mesure, par MM. Joly (électromagnétique à sensibilités multiples) ; Dutilh (appareils électromagnétiques) ; Illiovici (potentiomètre à déviation) ; — sur la traction électrique, par M. de Coninck (système de transmission électrique à fréquence variable), et M. Mähl (système de voies monorail suspendues) ; — sur l'électrochimie, par M. Bunet (à propos de l'électrometallurgie et de l'électrochimie), et de M. Maurice Leblanc fils (nouveau type de pile à oxyde de cuivre régénérable) ; — sur la construction des moteurs, par M. L. Guy (perte dans le fer des dynamos), et M. Bethenod (sur le calcul des moteurs électriques appliqués au démarrage des moteurs à explosion) ; — sur les applications des amplificateurs, par M. Larigaldie (découverte des icebergs en mer à l'aide des rayons infra-rouges), et M. Latour (intercommunications téléphoniques entre centrales). M. Harlé nous a entretenus de l'amélioration du facteur de puissance à l'aide de condensateurs. — M. Vedovelli nous a mis au courant des derniers perfectionnements réalisés dans les constructions des interrupteurs ultrarapides, et M. Jean Rey a traité, dans son ensemble, la question de la commande électrique des tourelles cuirassées. — M. Langevin a porté devant nous la question si controversée du choix de deux noms différents pour les unités de champ et d'induction, et sa communication a donné lieu à une très intéressante discussion déjà prise part MM. Abraham, Berthelot et Brylinski.

» Enfin, je dois adresser des remerciements particuliers à MM. Allain-Launay et Saget, qui n'ont pas hésité à transporter un matériel très compliqué pour illustrer leur conférence de brillantes expériences.

» Nous n'avons pas réalisé les promesses que nous vous avons faites l'an dernier au sujet de la publication plus régulière du bulletin ; nous avons actuellement un retard d'environ quatre mois. C'est un fait très regrettable, car le bulletin est le seul lien que nous ayons actuellement avec nos collègues de province et il importe de ne pas le laisser se relâcher. La cause initiale est toujours la lenteur avec laquelle un certain nombre de conférenciers nous font parvenir leur texte et la nécessité où nous étions jusqu'ici de les attendre pour composer des bulletins cor-

respondant à l'ordre du jour des séances. Le Bureau a décidé dans une de ses dernières réunions que si certains textes ne nous parvenaient pas en temps utile, ils seraient renvoyés à un bulletin ultérieur. Nous faisons appel à la bonne volonté des conférenciers pour nous éviter de mettre cette décision en application.

» Nous avons dû procéder, en vue de la publication prochaine de l'annuaire, à la révision de la liste de nos membres ; comme toutes les sociétés savantes qui ont procédé à cet examen, nous avons été très désagréablement surpris en constatant le grand nombre de ceux avec qui nous avons perdu tout contact. Les profonds bouleversements apportés par la guerre dans la position sociale de beaucoup d'entre nous en sont généralement la cause. Nous cherchons de toute manière à reprendre contact avec les disparus. M. Janet a bien voulu écrire personnellement à ses anciens élèves, avec des réponses presque toujours favorables. Nous demandons à chacun de vous d'agir de même autour de lui et de nous ramener ceux dont des circonstances difficiles nous ont momentanément séparés.

» Messieurs, il me reste pour terminer, le triste devoir de vous rappeler les noms de ceux de nos collègues, que la mort nous a enlevés cette année ; parmi eux, deux de nos anciens présidents, *MM. Carpentier et Lippmann*, et *M. Brocq*, qui fut trésorier de la Société pendant de longues années ; en outre : *MM. Louis Ancel, Armengaud jeune, Bede, Boudreaux, Brachotte, Bruhl, Brunot, Busson, Carré, Colusse, Dussaix, Landrin, Marting, Meynier, Monteils, Ribière, Roche, Roussel*.

» Nous devons ajouter à cette liste les noms de *MM. Boudeville, Burton, Halphen, Lecoq, Pradelle*, tués à l'ennemi, mais du décès desquels nous n'avons été avisés qu'au moment de la révision de la liste de nos membres.

» Nous renouvelons aux familles de nos collègues décédés l'expression de notre plus vive sympathie. »

Mis aux voix, ce rapport est adopté à l'unanimité.

RAPPORT ANNUEL SUR LE LABORATOIRE CENTRAL
ET L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ

M. Paul JANET. — « Messieurs, j'ai l'honneur de présenter à l'Assemblée générale de notre Société mon rapport annuel sur le fonctionnement du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Electricité pendant l'année 1921.

1. — Laboratoire central d'Electricité

» Le retour à l'état normal du Laboratoire que nous avions entrepris en 1919 et en 1920 semble aujourd'hui être un fait accompli.

» 1° *Personnel*. — Le personnel a repris ses proportions normales. Il compte quatre Chefs de travaux, cinq Chefs de travaux adjoints ou assistants et neuf aides. Néanmoins, étant donné le nombre croissant des essais et surtout le fait que les essais demandés au Laboratoire entraînent le plus souvent des opérations très délicates, le personnel n'est pas encore suffisant pour assurer les recherches d'intérêt général qui, comme nous le disions l'année dernière, doivent, dans l'esprit des fondateurs, être une des préoccupations du Laboratoire.

» 2° *Matériel*. — Nous éprouvons à l'heure actuelle les plus grandes difficultés à nous procurer les appareils dont nous avons besoin, les constructeurs nous demandant des délais considérables.

» Néanmoins, notre matériel d'essai s'est augmenté dans une certaine mesure ; nous citerons en particulier :

» 2 potentiomètres, dont un Carpentier et un Siemens ; 4 voltmètres électrodynamiques ; 3 ampèremètres électrodynamiques ; 1 électromètre Abraham-Villard pour 6 000 volts ; 2 voltmètres à cadre mobile de différentes sensibilités ; 9 transformateurs de tension 3 000, 6 000, 15 000 volts ; 6 transformateurs d'intensité. Nous devons signaler ici que ces appareils sont d'une réalisation beaucoup plus délicate qu'on ne le croit communément : bien que notre commande ait un peu plus d'un an de date, nous avons dû faire revoir par le constructeur trois de ces transformateurs qui ne remplissaient pas les conditions exigées.

» Nous disposons jusqu'à présent, pour les divers essais en

courant alternatif, d'un système de quatre alternateurs, deux diphasés et deux triphasés, entraînés par le même moteur à courant continu. Grâce à des fonds laissés à la disposition du Laboratoire par notre regretté collègue M. Eugène Sartiaux, nous avons pu, pour la rendre plus souple, dédoubler cette installation, ce qui a nécessité l'achat d'un nouveau moteur à courant continu et d'un nouveau tableau de réglage.

» Nous signalerons enfin que le Comptoir d'Achat de tôles dynamo a fait don au Laboratoire d'un groupe, moteur à courant continu-alternateur, pour les essais de tôles par la méthode du wattmètre. L'alternateur est muni d'un commutateur spécial pour la détermination du facteur de forme.

» 3° *Essais.* — Les essais effectués au Laboratoire ont été de 1 176 contre 1 247 en 1920 ; les recettes se sont élevées à 172 473 francs contre 113 821 en 1920.

» Les essais se répartissent ainsi :

	1921	1920
Lampes à incandescence (*)	351	566
Compteurs	171	236
Essais magnétiques	145	34
Rigidité diélectrique	138	117
Piles	58	35
Résistivité	51	54
Voltmètres	43	27
Ampéremètres	39	38
Machines	35	27
Isolements	15	3
Accumulateurs	14	12
Wattmètres	14	10
Paratonnerres	2	4
Lampes à arc	0	1
Divers	100	83

» Ce qui frappe le plus lorsqu'on examine la nature des essais demandés au Laboratoire, c'est le nombre croissant des essais portant sur les matériaux utilisés en électrotechnique. On sent, de plus en plus, la préoccupation des constructeurs de vérifier soigneusement les diverses substances avant de les utiliser dans leurs machines.

» C'est ainsi que nous constatons une augmentation notable du nombre de déterminations de la rigidité diélectrique des huiles (123) cette année et des isolants.

» Une importante manufacture d'isolants a même conclu un

(*) Portant sur des groupes de 1 à 5 lampes.

contrat avec le Laboratoire, pour la vérification périodique de sa fabrication.

» La détermination de la rigidité diélectrique des huiles se fait au moyen de l'appareil du type prévu par le cahier des charges établi par l'Union des Syndicats. Suivant le désir exprimé par les intéressés, les huiles à essayer sont soumises ou non, avant l'essai, à une dessiccation préalable.

» Nous devons signaler à ce sujet combien est regrettable l'insuffisance des moyens dont dispose le Laboratoire pour les essais à haute tension et qui sont inférieurs à ceux dont on dispose dans certaines usines. La réalisation d'une nouvelle installation s'impose.

» Le nombre des essais magnétiques a cru également dans de grandes proportions.

» Le Laboratoire a effectué, en 1921, 64 déterminations de pertes totales par la méthode du wattmètre, contre 34 en 1920.

» Ces essais sont effectués conformément au projet du cahier des charges établi par la Commission technique du Syndicat des Constructeurs de gros Matériel électrique et accepté par le Comptoir d'Achat de tôles dynamos.

» J'ai signalé plus haut que ce dernier organisme avait fourni au Laboratoire le matériel nécessaire à ce genre d'essais.

» Par réciprocité, des réductions importantes ont été consenties sur le prix des essais aux adhérents du Comptoir d'Achat de tôles.

» Ces déterminations de pertes totales par la méthode du wattmètre, surtout quand elles se rapportent à des tôles de qualité extra-supérieure ayant des pertes de l'ordre 1,4 watts par kilogramme, présentent de nombreuses difficultés, sur lesquelles MM. Jouaust et Lange ont attiré l'attention dans un article paru dans le bulletin d'août 1921, de la Société française des Electriciens.

» Les wattmètres utilisés dans ces mesures fonctionnent sur des circuits ayant parfois des facteurs de puissance de l'ordre de 0,07.

» Beaucoup de wattmètres ne fournissent dans ces conditions que des résultats complètement erronés.

» Aussi la mise au point de la méthode de mesure a-t-elle nécessité une étude très complète, qui vient seulement d'être ter-

minée. Nous croyons donc devoir attirer l'attention des constructeurs qui voudraient effectuer eux-mêmes ce genre de mesures, sur les erreurs grossières qu'ils peuvent commettre s'ils ne prennent pas certaines précautions.

» De même, dans la détermination de la perméabilité au moyen des perméamètres, de petites différences dans les étalonnements des balistiques employés, peuvent amener de grosses différences, pour certaines variétés de tôles, dans la valeur du champ magnétisant nécessaire pour obtenir une induction donnée.

» C'est ce qui a amené le Laboratoire à réaliser des éprouvettes étalons permettant une facile vérification de l'étalonnement des balistiques et des fluxmètres. Le Laboratoire est d'ores et déjà en mesure de fournir de semblables éprouvettes à tous ceux qui en feront la demande.

» L'emploi de plus en plus fréquent des lampes à atmosphère gazeuse, nous a obligés à modifier nos procédés photométriques. Pour de semblables lampes, la définition de l'intensité lumineuse dans une direction donnée ne présente aucun sens.

» Ces lampes ne peuvent être définies que par le flux lumineux émis.

» C'est ce qui a amené M. Laporte à réaliser un photomètre sphérique diffusant, d'après le principe indiqué, il y a bien des années déjà, par notre Président d'honneur M. Blondel.

» Ce photomètre diffusant est constitué par une cavité sphérique en plâtre de 1 mètre de diamètre. La réalisation d'un appareil de cette taille n'a pas été sans rencontrer quelques difficultés, que M. Laporte a su heureusement surmonter. Nous espérons que M. Laporte pourra prochainement présenter à la Société quelques renseignements plus détaillés sur cet intéressant appareil, qui a pu être réalisé grâce aux ressources mises à notre disposition par notre ancien Président, M. Larnaud.

» Signalons encore l'examen des compteurs électriques soumis à l'approbation ministérielle. Cet examen occupe l'activité d'une partie du personnel du Laboratoire, sous la direction de M. Durand.

» Enfin, la continuation des essais d'accumulateurs de sous-marins, demandés par le Ministère de la Marine, constitue une partie très importante de nos travaux.

» Nous rappellerons que ces essais sont conduits dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles de la pratique. Les accumulateurs sont, pendant la charge, placés sur des appareils leur donnant des mouvements à peu près semblables à ceux auxquels ils seraient soumis à bord, sous l'effet du roulis et des trépidations des moteurs et, par suite, les essais apportent les renseignements les plus précieux sur la manière dont les batteries se comporteront plus tard dans la réalité.

» Cet exemple a été suivi par un constructeur d'accumulateurs, qui nous a demandé également de faire subir des trépidations aux éléments qu'il avait soumis à notre examen.

4° *Recherches.* — Comme je l'ai dit plus haut, le temps occupé aux essais ne permet guère au personnel du Laboratoire de se livrer aux recherches. D'importantes subventions nous seraient nécessaires pour cela.

» Nous devons mentionner toutefois que MM. de la Gorce et Bajon consacrent tout leur temps disponible à l'amélioration des méthodes de mesure des courants alternatifs.

» C'est ainsi qu'un nouveau procédé a été appliqué au Laboratoire pour mesurer les puissances en courant alternatif, procédé qui a fait l'objet d'une note à l'Académie des Sciences.

» M. de la Gorce, qui vous avait déjà communiqué en 1920 ses recherches sur la répartition des potentiels dans les chaînes d'isolateurs, poursuit ses recherches à ce sujet.

» A la demande d'une importante Compagnie de Navigation, nous avons été amenés à imaginer et à essayer un procédé dérivé de la balance de Hughes, permettant de déceler les fêlures dans les tubes de condenseur.

» M. Frigon, Ingénieur diplômé de l'Ecole supérieure d'Électricité, titulaire de la bourse Hughes, poursuit en ce moment des recherches sur les pertes dans les diélectriques.

» Le Laboratoire, qui, de par ses attributions, doit se considérer comme le gardien des unités électriques en France, n'a pas perdu de vue cette importante question, et M. Jouaust continue l'étude des dix étalons de l'ohm international.

» Je vous ai signalé, l'année dernière, les difficultés rencontrées dans cette étude, par la proximité du Métropolitain et du Nord-Sud, dont les courants influencent nos galvanomètres, ce qui na

permet d'effectuer les mesures qu'entre 1 heure et 3 heures du matin. Comme, d'autre part, il s'agit de comparer dix tubes deux à deux, on voit que le nombre de mesures est extrêmement élevé. Il s'agit donc là d'un travail de longue haleine qui d'ailleurs est très avancé maintenant, et dont nous espérons pouvoir vous communiquer assez prochainement les résultats.

» 5° *Souscriptions et subventions.* — Comme les années précédentes, le Laboratoire a reçu d'importantes subventions, qui vous ont été signalées en détail par votre Commission des Comptes, et que je tiens à rappeler ici. Le montant des souscriptions pour le Laboratoire s'est élevé en 1921 à 15 600 francs; de plus, M. Legouez a bien voulu nous remettre sur les fonds laissés par M. Sartiaux, et conformément à ses intentions, une somme de 19 000 fr. Enfin, le Ministère des Travaux publics (Service des Recherches), nous a accordé une subvention de 100 000 francs. Qu'il nous soit permis d'exprimer ici à ces généreux donateurs l'expression de notre vive gratitude.

II. — École supérieure d'Électricité

» I. *Matériel.* — Nous avons cette année terminé le programme de revision et d'augmentation de notre matériel signalé précédemment. Nous notons :

» A) *Atelier.* — La remise en état et l'augmentation des collections de gabarits en bois destinés aux exercices pratiques sur les enroulements, ainsi que l'acquisition d'une cisaille à froid de moyen calibre.

» B) *Salle des machines.* — La commande de deux groupes diphasés et triphasés de 4,5 kw, pouvant être transformés en groupe moteur générateur à courant continu 110 v, par remplacement de l'alternateur.

» C) *Salle des mesures.* — L'acquisition d'un appareil Epstein-Armagnat et de nombreux appareils de mesures, ainsi que le don d'une collection de compteurs fait à l'Ecole par la Compagnie anonyme continentale pour la Fabrication des Compteurs et la Compagnie Sangamo, à qui nous adressons ici nos vifs remerciements.

» II. *Enseignement et personnel.* — Après l'important remaniement relatif au deuxième groupe des conférences de l'Ecole (Installations électriques), que j'ai signalé dans mon précédent rapport, notre Conseil a eu à s'occuper dans le courant de 1921 de quelques changements dans les conférences du premier groupe (Matériel).

» Notre ancien Président, M. Boucherot, nous avait déjà depuis quelque temps exprimé le désir d'être libéré de la partie de ses conférences relative au calcul des machines à courants alternatifs qu'il professe depuis 1897, pour se consacrer entièrement à des sujets plus généraux se rapportant à l'emploi des courants alternatifs. Voici donc le programme qu'il nous a proposé :

« Considérations d'ensemble sur les machines d'induction ; Conservation et transfert de la puissance réactive ; Variation cinétique de la tension et oscillations des groupes électrogènes, couplés ou non ; Surintensités et surtensions ». La Commission administrative de l'Ecole s'est empressée de déférer à ce désir, et, en conséquence, a demandé à M. de Pistoye, précédemment chargé des conférences sur le calcul et la construction des machines à courants continus, de se charger également du calcul et de la construction du matériel à courants alternatifs. Nous aurons ainsi, en même temps que le précieux avantage de voir M. Boucherot traiter des sujets où sa contribution personnelle a été si importante, celui de réunir dans une même main tout ce qui se rapporte au calcul et à la construction des machines électriques.

» La Commission a dû également se préoccuper du remplacement de M. Debierne, qui, à notre grand regret, n'a pu nous continuer sa collaboration pour les quelques conférences faites chaque année à nos élèves sur la radioactivité, les décharges dans les gaz et les rayons X. M. le D^r Broca, Membre de l'Académie de Médecine, Professeur à la Faculté de Médecine, a été chargé pour cinq ans de ces conférences, qu'il se propose de compléter par quelques séances expérimentales dans son laboratoire. Je suis particulièrement heureux de souhaiter ici la bienvenue parmi nous à M. Broca, dont personne n'a oublié la longue collaboration à l'activité de la Société et les remarquables travaux faits, il y a quelques années, au Laboratoire central d'Electricité, en collaboration avec M. Laporte.

» III. *Promotion XXVII^e* (1920-1921). — Il a été délivré, à la fin de juillet 1921, 225 diplômes, se répartissant ainsi :

Officiers et Ingénieurs délégués par l'Etat	34
Ingénieurs des Arts-et-Métiers	23
Licenciés ès-Sciences	20
Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique	9
Elèves étrangers diplômés d'Ecoles techniques supérieures.	9
Ingénieurs stagiaires de 1 ^{re} classe de l'Ecole Commerciale Lyonnaise	5
Ingénieurs des Arts et Manufactures	4
Ingénieurs des Instituts électrotechniques de Grenoble et Toulouse	3
Elèves reçus aux concours antérieurs et divers	18
Elèves reçus aux concours de 1920	95
Total	225

» IV. *Promotion XXVIII^e* (1921-1922). — a) *Concours d'entrée.* — Pour le concours d'entrée du mois d'octobre 1921, notre Conseil, très désireux de revenir le plus tôt possible aux conditions d'avant-guerre, a supprimé les majorations de moyenne précédemment accordées aux élèves mobilisés. Il a cependant maintenu un léger avantage aux candidats, d'ailleurs peu nombreux, de la classe 1920, mobilisés au cours de l'année 1921. On peut donc considérer que le retour aux conditions normales du concours est accompli.

» b) *Composition de la promotion.* — La promotion actuellement en cours d'études, comprend 240 élèves.

» En voici la composition :

Officiers et Ingénieurs délégués par l'Etat	46
Ingénieurs des Arts et Métiers	45
Licenciés ès-Sciences et assimilés	23
Ingénieurs des Arts et Manufactures	18
Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique	14
Ingénieurs des Instituts électrotechniques de Grenoble, Nan- cy, Toulouse	14
Ingénieurs stagiaires de 1 ^{re} classe de l'Ecole Centrale Lyon- naise	9
Elèves étrangers d'Ecoles techniques supérieures	5
Officiers de Marine (en congé régulier)	2
Ingénieurs civils des Mines (Paris et Saint-Etienne)	2
Ingénieurs de l'Ecole de Physique et de Chimie industrielles (Section de Physique)	2
Elèves reçus aux concours antérieurs et divers	5
Elèves reçus aux concours de 1921 (sur 240 candidats)	55
Total.....	240

» A ces élèves, il convient d'ajouter 4 auditeurs libres.

» La promotion comprend une élève femme de nationalité

française (Décision du Conseil de Perfectionnement de l'Ecole en date du 16 octobre 1917).

» c) *Dispositions matérielles prises pour l'organisation de l'Enseignement.* — L'importance de la promotion actuelle étant au moins égale à celle de l'an dernier, nous avons dû, encore une fois, pour notre enseignement oral, avoir recours à l'hospitalité de l'Institut Pasteur; nous adressons ici nos plus chaleureux remerciements à M. le docteur Roux, pour la libéralité avec laquelle il a bien voulu répondre à notre appel ; de son côté, la Commission administrative de l'Ecole a tenu à reconnaître le grand service qui nous était rendu par l'attribution à l'Institut Pasteur d'une somme égale à celle qui avait été votée l'an dernier.

» En ce qui concerne les travaux pratiques, nous avons dû maintenir, dans nos propres locaux, le dédoublement des séries de manipulations. Bien qu'un certain nombre de dispositions matérielles nouvelles, notamment à la Salle d'Essais de machines, nous aient permis d'améliorer notablement les conditions de travail de nos élèves, nous souhaitons néanmoins pouvoir revenir au plus tôt à l'ancienne organisation.

» V. *Relations de l'Ecole avec l'Université.* — Le nombre des étudiants de la Faculté, inscrits en 1920-1921, aux cours et travaux pratiques du Certificat d'Electrotechnique générale, a été de 43. 16 certificats ont été délivrés en juillet et 2 en octobre.

» VI. *Section de Radiotélégraphie. Promotion 1920-1921.* — Sur la proposition de M. le général Ferrié, le Conseil de Perfectionnement, dans sa séance du 18 mai 1921, a décidé de transformer en diplôme d'ingénieur-radiotélégraphiste, de la Section de Radiotélégraphie de l'Ecole supérieure d'Electricité, le brevet d'études radiotélégraphiques précédemment institué par lui, dans sa séance du 26 février 1913. Il a désiré consacrer ainsi l'importance toujours croissante de l'enseignement donné dans cette section et qui dure actuellement sept mois environ.

» Conformément à cette décision, il a été délivré à la fin de juin 1921, 63 diplômes d'ingénieurs-radiotélégraphistes et 1 certificat d'études de radiotélégraphie.

» *Promotion 1921-1922.* — a) *Enseignement.* — Les conférences préliminaires de la Section de Radiotélégraphie ont été l'objet d'un

remaniement d'ensemble destiné à donner aux élèves, outre les principes fondamentaux de l'Electrotechnique, quelques vues d'ensemble sur l'état actuel des applications industrielles de l'électricité.

» C'est ainsi que M. Guilbert, Sous-Directeur de l'Ecole supérieure d'Electricité, a été chargé de quatre conférences sur l'Electrotechnique appliquée ; M. Mestraud, ingénieur de la Marine, diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité, de trois conférences sur les stations centrales, et M. Jumau, de deux conférences sur l'emploi des accumulateurs en télégraphie sans fil.

» Les conférences du cours de radiotélégraphie proprement dit continuent à être professées par le corps d'éminents spécialistes qui en a précédemment assuré le succès ; l'enseignement, toujours placé sous la haute direction de M. le général Ferrié, reste soigneusement tenu au courant des nouvelles découvertes de cette science.

» b) *Composition de la promotion.* — La promotion en cours d'études comprend 49 élèves.

» En voici la composition :

Officiers délégués par le Ministère de la Guerre :

Génie	6
Aéronautique militaire	4
Infanterie	3
Artillerie	1
Artillerie coloniale	1

Officiers et Ingénieurs délégués par le Ministère de la Marine : 16

Officiers des gouvernements étrangers (armée, marine et ingénieurs) ⁽¹⁾	15
Elèves civils, dont 2 étrangers	3

» Nous continuons à recevoir le concours le plus large de la Télégraphie militaire pour les travaux pratiques de la section de Radiotélégraphie. Nous ne saurions trop remercier ici M. le mi-

⁽¹⁾ Classement par nationalités des délégués étrangers à la Section de Radiotélégraphie :

Argentine	Officiers de Marine	2
Belgique	Officier de l'armée de terre	1
Chine	Ingénieurs électriciens et radiotélégraphistes	8
Danemark	Ingénieur des télégraphes	1
Espagne	Officiers de marine	3
Total		15

nistre de la Guerre et M. le général Ferrié de ce précieux concours.

» Une huitième session s'ouvrira le 20 novembre prochain.

» VII. *Anciens élèves.* — Le nombre total d'anciens élèves ayant passé par l'Ecole (non compris la promotion actuelle) est de 2 251, sur lesquels 1 922 ont obtenu le diplôme. Ces derniers se répartissent ainsi :

Officiers et Ingénieurs de l'Etat	244
Licenciés ès-Sciences	253
Ingénieurs des Ecoles nationales d'Arts et Métiers	252
Anciens élèves de l'Ecole Polytechnique	146
Ingénieurs des Arts et Manufactures	142
Elèves étrangers diplômés d'Ecoles techniques supérieures.	135
Ingénieurs civils des Mines, etc.	27
Ingénieurs de l'Ecole municipale de Physique et de Chimie industrielles, etc.	20
Elèves reçus au concours et divers	703
Total	1 922

» Le nombre d'anciens élèves brevetés et diplômés de la Section de Radiotélégraphie est d'environ 153.

» VIII *Société amicale des Ingénieurs sortis de l'Ecole supérieure d'Electricité.* — La Société amicale de nos anciens Elèves, sous l'active impulsion de son bureau, nous prête le concours le plus précieux par ses services de placement, sa caisse de crédits d'études et sa collaboration, soit dans le sein de notre Conseil de Perfectionnement, soit par le fonctionnement de ses diverses commissions.

» IX. *Fondation Augustin Guyau.* — Le Comité de la Société française des Electriciens a eu, pour la première fois, en novembre 1921, à procéder à l'attribution de la Fondation Augustin Guyau, que je signalais dans un de mes précédents rapports et qui consiste en une bourse bi-annuelle de 4 800 fr. L'examen des nombreux dossiers de demandes constitués à cette occasion nous a permis de constater combien de situations matérielles insoupçonnées étaient dignes d'intérêt et d'apprécier les sacrifices très considérables que s'imposent certains de nos élèves et leurs familles pour participer à notre enseignement.

» Grâce à la générosité des donatrices de la Fondation, Mmes Fouillée et Guyau, notre Comité a pu disposer cette année, en plus de la bourse régulière, d'une somme supplémentaire de 1 200

francs. Nous avons donc pu, au nom d'Augustin Guyau et selon sa propre parole, tendre la main à deux de ses jeunes camarades, au lieu d'un seul, et les regrets de notre Comité de ne pouvoir répondre à beaucoup de demandes qui lui avaient été adressées ont été diminués d'autant.

» *X. Dons et subventions.* — Ainsi qu'il vous a été signalé dans le rapport de la Commission des Comptes, de généreux donateurs, parmi lesquels notre président, M. Jean Rey, ont tenu à compléter le dernier versement que, conformément aux conventions passées avec le regretté Lucien Poincaré, Recteur de l'Académie de Paris, nous devions faire à l'Université de Paris, pour la création du cours d'Electrotechnique générale. Comme vous le dira M. le président, cette création est aujourd'hui définitive, grâce à un crédit spécial inscrit au budget de 1922.

» D'autre part, à la suite d'une visite faite à l'Ecole par M. le sous-secrétaire d'Etat de l'Enseignement technique, M. Gaston Vidal a bien voulu nous accorder une importante subvention de 50 000 francs.

» *XI. Agrandissement de l'Ecole.* — De très actives bonnes volontés ont continué, à côté de notre Comité, et en plein accord avec lui, à étudier les voies et moyens à employer pour assurer les agrandissements considérables de l'Ecole, dont, depuis plusieurs années, nous signalons la nécessité. A la suite de discussions et d'études approfondies, il a été décidé qu'il y avait lieu de former, à côté de la Société française des Electriciens, un organisme auxiliaire destiné à assurer à l'Ecole les ressources matérielles qui lui sont nécessaires. Il serait prématuré de donner aujourd'hui des renseignements plus précis à ce sujet. Au surplus, ces renseignements seront très prochainement fournis par des circulaires et des notices actuellement en préparation.

Ainsi s'affirme le succès et la vitalité des deux belles institutions qu'a fondées la Société française des Electriciens : leur reprise si rapide d'activité, après les deux années que nous avons traversées, est un sûr garant de leur prospérité à venir. »

Mis aux voix, ce rapport est adopté à l'unanimité.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

THÉORIE DE LA DYNAMO A TROIS BALAIS

L'auteur se propose d'établir une théorie, suffisamment exacte quantitativement, de la dynamo à trois balais, si employée à l'heure actuelle, pour l'équipement électrique des automobiles. La méthode, analogue à la méthode classique, dite « des deux réactions » de M. A. Blondel pour l'étude de la chute de tension des alternateurs, permet de prévoir tous les phénomènes relevés expérimentalement ; elle rend compte, notamment, du phénomène bien connu de la décroissance du débit sur batterie d'accumulateurs à partir d'une certaine vitesse, laquelle est sensiblement indépendante du calage du balai auxiliaire.

Les équations établies mettent, d'ailleurs, en mesure de comparer le mode de régulation en question avec celui basé sur l'emploi d'un enroulement inducteur série démagnétisant.

M. BETHENOD. — « Messieurs, la théorie de la dynamo à trois balais a été déjà abordée devant vous par M. Iglésis ⁽¹⁾. Dans son intéressante étude, notre collègue ramène les phénomènes mis en jeu à la *modification du calage de la ligne neutre* qui se produit automatiquement dans une telle machine, lorsque le débit et la vitesse varient eux-mêmes.

» Cette façon de procéder a l'avantage de donner une interprétation physique immédiate aux phénomènes en question, mais ne permet pas, par contre, d'aboutir à une expression *directe*, simple et commode, du débit en fonction de la vitesse. En outre, la notion de ligne neutre est assez délicate dans le cas réel de machines à pôles saillants, et elle n'a guère de signification précise que pour un système inducteur sans pôles saillants, avec distribution sinusoïdale du flux. Enfin, l'importance industrielle prise actuellement par la dynamo à trois balais, notamment pour l'équipement électrique des automobiles, est devenue considérable ; il m'a donc paru utile de présenter aujourd'hui une théorie de cette machine permettant de déterminer assez exactement l'importance des diverses constantes de la machine, et présentant un caractère quantitatif suffisant. Cette théorie rend compte notamment, d'une façon complète, du phénomène caractéristique, bien connu, de la décroissance du débit sur batterie d'accumulateurs à partir d'une certaine vitesse, phénomène quasi impossible à prévoir dans la simple hypothèse du calage variable de la ligne neutre.

» Avant d'aborder l'analyse du fonctionnement de la machine à trois balais, au moyen d'une méthode imitée de la méthode classique, dite « des deux réactions », créée si heureusement par M. A.

(¹) Séance du 2 février 1921. *Bulletin de la Société française des Electriciens*, tome I (4^e série), p. 31.

Blondel pour l'étude des alternateurs, il importe d'exposer quelques remarques préliminaires, très élémentaires, qui facilitent beaucoup la compréhension des choses. Considérons un induit (fig. 1) supposé bipolaire pour simplifier, et muni, outre les balais normaux BB_1 , d'un balai auxiliaire b , l'angle B_1Ob étant égal à θ ; lorsqu'on lui communique une vitesse appréciable, en y faisant circuler un certain courant I , fourni par une source extérieure convenable A (accumulateurs, piles, etc.), on constate que pour $\theta = 0$, le voltmètre V branché entre les balais B et b, mesure simplement la chute de tension ohmique à travers l'induit, constante quelle que soit la vitesse, même si on favorise la fermeture du flux créé par les ampères-tours de l'induit au moyen d'un anneau en fer extérieur. Si, au contraire, l'angle θ est fini, le balai b

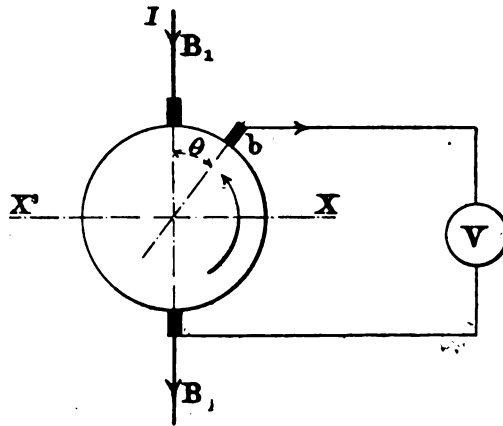


Fig. 1.

étant calé en avance du balai B_1 , dans le sens de rotation choisi, le voltmètre V indique l'existence d'une tension supplémentaire qui passe par un maximum pour un certain calage, et qui redevient évidemment nulle pour $\theta = \pi$. Cette tension supplémentaire correspond forcément à une force électromotrice créée par la rotation des spires de l'induit, comprises entre les balais B et b, dans le champ produit par la circulation du courant I entre les balais B et B_1 ; ce ci explique pourquoi elle est nulle pour $\theta = 0$ et $\theta = \pi$, et pourquoi elle est proportionnelle à la vitesse angulaire ω de l'induit. D'ailleurs, on peut admettre pratiquement, du moins dans une dynamo à entrefer normal, qu'elle est aussi proportion-

nelle à un débit I , donc de la forme $\mu \omega I$ ⁽¹⁾. Comme on le verra par la suite, l'existence de cette f. e. m. constitue toute la clef de la régulation par balai auxiliaire d'excitation. Notons en passant que si le débit i à travers le circuit b V B n'est pas négligeable, une force électromotrice réciproque $\mu' \omega i$ (μ' sensiblement égal à μ) prend naissance entre les balais $B B_1$; dans l'application visée ici, l'effet de cette f. e. m. est d'ailleurs sans grande importance. Quoi qu'il en soit, passons maintenant à l'étude de la machine complète, montée suivant le schéma de la figure 2, qui se comprend de lui-même. Désignons donc par :

- » e , la force contre-électromotrice de la batterie ;
- » R_1 , la résistance de la portion d'induit comprise entre les balais d'excitation b B ;
- » R_2 , la résistance du circuit de charge, y compris la portion b B_1 de l'induit ;

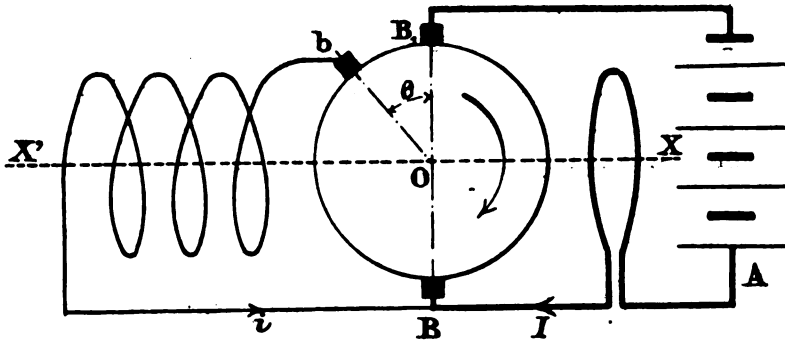


Fig. 2.

- » r , la résistance de l'enroulement d'excitation parcouru par le courant i ;

» m , le coefficient qui, multiplié par la vitesse ω , mesure la f. e. m. créée entre les balais B B_1 par le flux inducteur lorsque i vaut 1 ampère ; ce même flux crée entre les balais b B une f. e. m. de la forme $km \omega i$ ($k < 1$). Faisons en outre les trois remarques suivantes :

» 1° On suppose ici que le système inducteur de la machine est assez loin de la saturation ; cette hypothèse est légitimée du fait que le courant i diminue très rapidement avec la vitesse, comme on le vérifiera ultérieurement. Du reste, toute dynamo à débit li-

⁽¹⁾ En fonction de l'angle θ , dans le cas d'une distribution sinusoïdale du champ créé par l'induit, il est facile de démontrer que cette f. e. m. est proportionnelle à $\sin \theta$.

mité à toutes vitesses est forcément une machine peu saturée, et l'erreur commise en la supposant telle, même aux bas régimes, demeure relativement faible d'ordinaire ; on pourrait assez facilement tenir compte de la saturation, par une méthode justement analogue à celle indiquée par M. A. Blondel pour les alternateurs modernes, très saturés généralement, mais, dans la présente communication, nous préférons nous en tenir au cas où le flux inducteur est proportionnel au courant d'excitation.

» 2° En général, l'arc polaire est voisin de 120 degrés *électriques* ; il en résulte que le coefficient k demeure très voisin de l'unité, tant que l'angle θ ne dépasse pas 30°, c'est-à-dire tant que le balai n'avance pas trop sous la corne polaire. En effet, jusqu'à cette limite, le champ inducteur correspondant au courant i coupe toujours le même nombre de conducteurs induits actifs dans l'angle $b O B = \pi - \theta$. On verra plus loin l'importance de cette remarque.

» 3° Enfin, pour donner plus de généralité aux formules et faciliter les comparaisons, nous supposerons que l'inducteur comporte des spires-série démagnétisantes, donnant lieu, entre $B B_1$ d'une part, $b B$ d'autre part, à des f. e. m. égales respectivement à $M \omega I$ et $k M \omega I$.

» On peut ainsi écrire :

$$(1) \quad R_1 (I + i) + r i = k m \omega i - k M \omega I - \mu \omega I,$$

$$(2) \quad R_1 (I + i) + R_2 I + e = m \omega i - M \omega I + \mu' \omega i \quad (').$$

» Tirons i de (1) et portons cette expression dans (2) ; on obtient :

$$e + (R_1 + R_2 + M \omega) I = \frac{(m \omega + \mu' \omega - R_1) (k M \omega + \mu \omega + R_1)}{k m \omega - (r + R_1)} I,$$

d'où, en simplifiant,

$$(3) \quad I = \frac{e [k m \omega - (r + R_1)]}{\omega^2 (m \mu + k M \mu' + \mu \mu') + \omega [(1 - k)(M + m) R_1 + M r + \mu' R_1 - k m R_2] + r R_1 + r R_2 + R_1 R_2}.$$

» Telle est l'expression du débit I en fonction des diverses variables, notamment de la vitesse angulaire ω . Il est très intéressant, pour une application à l'éclairage des véhicules, au moyen

(') Il est facile de voir que les signes de $\mu \omega I$ et $\mu' \omega i$ doivent être pris opposés. Voir à ce sujet mon étude antérieure sur le moteur à répulsion compensé système Lafour. *L'Eclairage électrique*, 1^{er} octobre 1904, N° 40, pages 7 et 8.

d'une dynamo entraînée par le moteur du véhicule ou par l'essieu, d'examiner comme varie I lorsque ω passe des plus basses aux plus hautes valeurs. Tout d'abord, tant que la vitesse est inférieure à la valeur définie par

$$(4) \quad \omega_0 = \frac{r + R_1}{k m},$$

le débit I est négatif, c'est-à-dire la batterie se décharge dans la dynamo.

» Cette vitesse critique est du reste analogue à celle qui apparaîtrait, comme bien connu, si la machine fonctionnait en dynamo shunt ordinaire ; d'ailleurs, le coefficient k est, en général, assez voisin de l'unité, ainsi qu'il a été signalé plus haut. Le point d'amorçage de la dynamo à trois balais débitant sur batterie n'est donc pas sensiblement élevé par rapport à celui d'une dynamo shunt ordinaire de même constitution, à égalité de dépense dans l'excitation ⁽¹⁾.

» Lorsque la vitesse ω croît encore, le débit augmente également, mais la présence au dénominateur du premier terme, *proportionnel au carré de la vitesse* ω , montre immédiatement que le débit passera par un maximum pour une certaine valeur de ω , pour ensuite décroître indéfiniment lorsqu'on fait tourner l'induit de plus en plus rapidement.

» Ce phénomène, assez singulier au premier abord, constitue probablement la caractéristique la plus essentielle de la dynamo à trois balais ; comme nous l'avons fait pressentir au début de cette communication, c'est bien à l'existence de la force électromotrice $\mu \omega I$, produite par le champ transversal de l'induit dans le circuit inducteur, qu'est due cette propriété très spéciale. Celle-ci est d'ailleurs utile dans le cas de l'éclairage d'une automobile ; en effet, quand la voiture effectue un service de ville, à allure modérée et en prise directe, c'est-à-dire le moteur tournant assez lentement, il importe que la dynamo fournisse cependant les ampères-heures nécessités par un usage fréquent du démarreur et par des stationnements prolongés le soir avec lanternes allumées. Au contraire, lorsque la même voiture est utilisée pour de longues ran-

⁽¹⁾ En réalité, on peut toujours, même lorsque k est relativement réduit ($k = \frac{1}{2}$, par exemple), maintenir ω_0 à une valeur suffisamment basse, en augmentant la section du cuivre inducteur ; ceci revient simplement à baisser la tension d'excitation, au prix d'une augmentation des pertes Joule dans l'induit.

données de jour, à allure rapide, il ne faut pas que la batterie ris-que d'être surchargée ; la dynamo à trois balais, convenablement réglée, satisfait automatiquement à ces deux conditions.

» En pratique, le premier terme du dénominateur de l'expres-sion (3) du débit I devient rapidement prépondérant, dès qu'on dépasse nettement la vitesse critique ω_0 , du moins lorsque les résistances d'induit sont faibles et que la machine est dépourvue de tout enroulement inducteur série ($M = 0$). Le maximum de I a alors lieu approx imativement pour la vitesse

$$(5) \quad \Omega = 2 \frac{r + R_i}{k m} = 2 \omega_0.$$

» Ainsi donc, avec une dynamo à trois balais débitant sur bat-terie, le courant débité passe par un maximum pour une vitesse voisine du double de la vitesse à laquelle ce courant s'annule.

» Cette règle très simple n'est évidemment qu'une première approximation, et il est possible d'obtenir une valeur plus rigou-reuse de Ω , au moyen de l'égalité (3). Cependant, l'examen des courbes expérimentales montre que l'ordre de grandeur de Ω est bien, en moyenne, celui prévu par (5) ; bien entendu, la pré-sence d'un enroulement-série supplémentaire sur l'inducteur per-met de modifier à volonté l'allure de la courbe $I = f(\omega)$, le cas particulier $k = 1$, $\mu' = 0$, correspondant à la machine à deux ba-lais munie d'un simple « décompoundage ». La valeur de M peut même être telle que le terme en ω du dénominateur de (3) soit nul à toutes les vitesses ; la formule (5) devient alors plus ri-goureuse, et c'est probablement à cette circonstance qu'est due l'allure caractéristique de la courbe obtenue avec la dynamo North-East, type G-12 (fig. 17 de l'étude de M. Iglésis). Il va de soi que le maximum du débit I est d'autant plus accusé que μ est plus faible, donc que l'angle θ est plus réduit ; ceci, évident à priori, est nettement confirmé par la discussion de la formule (3). La poursuite de cette discussion permettrait d'examiner en dé-tail bien des points encore ; je laisserai ce soin à ceux que la question intéresse. Nous signalerons cependant que, conformé-ment à une indication de M. Iglésis, la formule (3) montre que le débit monte proportionnellement à la force contre-électromo-trice e de la batterie ; c'est là évidemment une propriété assez fâcheuse pour la charge rationnelle de ladite batterie. Toutefois, sur une automobile, la surcharge de la batterie n'est guère à

craindre, pour des raisons multiples et évidentes ⁽¹⁾, et d'ailleurs la vie de cette batterie est limitée pratiquement par des causes étrangères à toute technique : manque de soins, chocs, etc. ; pour cet usage particulier, la question de bas prix importe avant tout, et une dynamo à régulation *interne* est alors très avantageuse, un régulateur de tension de fonctionnement *irréprochable* coûtant presque aussi cher, pour une dynamo de quelques centaines de watts, que pour une dynamo de plusieurs kilowatts.

» Au contraire, pour les chemins de fer par exemple, une conservation aussi longue que possible de la batterie doit être assurée *en principe, comme dans une installation fixe*. En particulier, le courant de charge doit s'annuler automatiquement lorsque la batterie est chargée à fond, si on veut éviter tout gondolement des

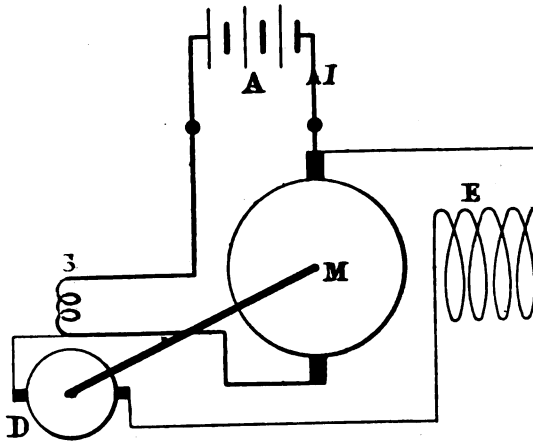


Fig. 3.

plaques ; la dynamo à trois balais peut conduire à ce résultat, grâce à l'adjonction de relais modifiant la constitution des circuits inducteurs, mais aux dépens de la simplicité qui forme le principal avantage de l'équipement avec dynamo à trois balais.

» Il ne semble donc pas que ce type d'équipement si intéressant pour les automobiles convienne aussi bien à l'éclairage des trains de chemins de fer ; c'est là une opinion toute personnelle, dont l'avenir jugera l'exactitude.

» En terminant, nous pensons qu'il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que le fonctionnement de la dynamo à trois ba-

(1) En particulier, l'usage fréquent du démarreur et de l'avertisseur électriques entraîne parfois, même de jour, une dépense notable d'ampères-heures.

lais est identique, au point de vue électrique, à celui de l'ensemble bien connu constitué de la façon suivante (fig. 3) :

» Une machine **M**, alimentant la batterie **A**, a son inducteur **E** monté en série avec l'induit d'une dynamo dévoltrice **D**, *les deux induits étant couplés mécaniquement*, et l'ensemble **ED** étant monté en dérivation aux bornes de la batterie; enfin, l'inducteur **S** de la machine **D** est parcouru par le courant de charge *I* de la batterie **A**. *A vitesse constante*, un tel ensemble de machines, du reste souvent employé en Electrotechnique pour des usages divers (Génératrices de groupes Ward-Léonard appliqués à la commande de laminoirs réversibles), offre un fonctionnement analogue à celui d'une simple machine munie d'un enroulement-série démagnétisant ; *mais, à vitesse variable, en raison même du couplage mécanique des deux induits M et D*, le débit sur batterie suit une loi définie par une égalité tout à fait analogue à l'égalité (3) ci-dessus, ce qui justifie entièrement l'analogie énoncée. »

REMARQUE SUR LA COMMUNICATION DE M. BETHENOD

M. IGLÉSIS. — « Dans l'intéressante communication qui vient de nous être présentée, notre éminent collègue, M. Bethenod, a mis en évidence l'influence des facteurs qui interviennent dans l'affaiblissement de la courbe de débit des dynamos à trois balais, qui se produit à partir d'une certaine vitesse.

» En partant de la force électromotrice de réaction $\mu\omega I$, il a établi une équation directe de I en fonction de ω , dans laquelle intervient, au dénominateur, un terme en ω^2 qui est la cause principale de la diminution progressive du débit dans les hautes vitesses.

» M. Bethenod a rappelé que cette chute de débit n'est pas un inconvénient dans le cas de l'application de la dynamo à trois balais à l'éclairage électrique des automobiles et qu'il en résulte, au contraire, certains avantages.

» Il en est de même dans le cas de l'application de la dynamo à trois balais à l'éclairage électrique des trains.

» Considérons, en effet, un équipement donné, installé sur une voiture attelée tantôt à un train rapide, tantôt à un train omnibus.

» Dans le second cas, du fait que la vitesse du train est plus faible, l'intensité moyenne débitée par la dynamo sera plus grande, ce qui est avantageux puisque dans ce cas la batterie a besoin d'être rechargée davantage, afin de fournir l'éclairage pendant les stationnements plus fréquents que s'il s'agit d'un train rapide.

» Le graphique de la figure 1 qui représente le diagramme du débit en fonction du temps a été relevé sur un train omnibus, équipé avec une dynamo « Stone-Lilliput » à trois balais. On voit qu'après chaque démarrage et avant chaque arrêt, le débit est plus grand que dans l'intervalle du parcours.

» Dans une autre application récente de la dynamo à trois balais à l'équipement électrique des avions, la Maison Gaumont a utilisé judicieusement l'allure de la courbe de débit des dynamos à trois balais pour résoudre le problème des dynamos autorégulatrices à courant continu haute tension pour communications radiotéléphoniques de bord.

» A cet effet (voir schéma figure 2), en bout d'arbre de la génératrice principale destinée à fournir la tension plaque, elle dis-

pose une excitatrice à trois balais qui débite dans le circuit com-

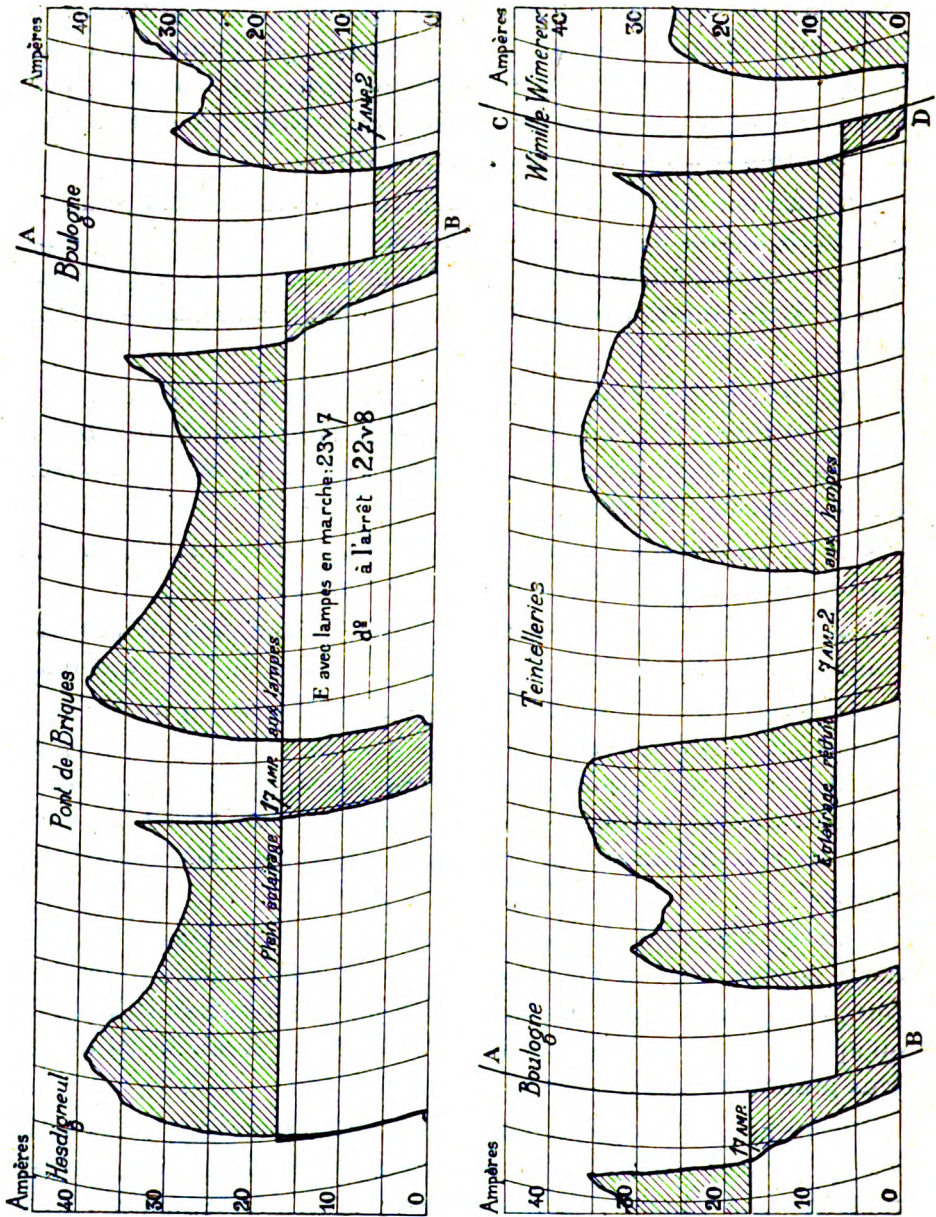


Fig. 1. — Intensité aux bornes de la dynamo à trois balais avec plein éclairage (17 ampères aux lampes).
Intensité aux bornes de la dynamo à trois balais avec éclairage réduit (7,2 ampères aux lampes).

prenant les inducteurs de la génératrice principale et une batterie d'accumulateurs.

» On utilise pour le réglage la partie descendante de la courbe de débit de l'excitatrice (voir figure 3).

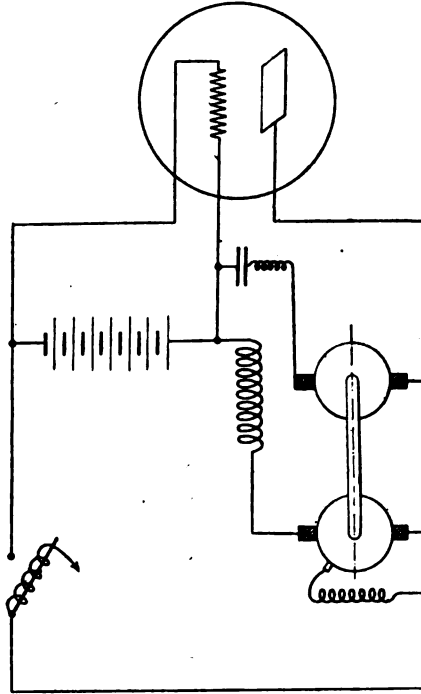


Fig. 2. — Application de la dynamo à trois balais à la régulation d'une régénératrice à haute tension.

» A la vitesse N_1 le courant d'excitation a une valeur i_1 plus grande que i_2 , qui correspond à la vitesse N_2 .

» En agencant convenablement les enroulements, il est possible d'obtenir un réglage suffisant de la tension plaque dans les limites de variation de vitesse du moteur de l'avion.

» Ce dispositif a été appliqué par la Maison Gaumont à des groupes de :

500 watts, 1 500 volts, avec excitatrice de 250 watts, 16 volts, et 1 000 watts, 1 500 volts, avec excitatrice de 500 watts, 16 volts.

» La figure 4 représente les valeurs du courant fourni par l'excitatrice à travers les inducteurs de la génératrice principale, à haute tension.

» La figure 5 reproduit la courbe de tension aux bornes de la génératrice principale, en fonction de la vitesse.

» La figure 6 correspond à l'allure que devrait avoir le courant inducteur dans la génératrice haute tension, pour maintenir aux

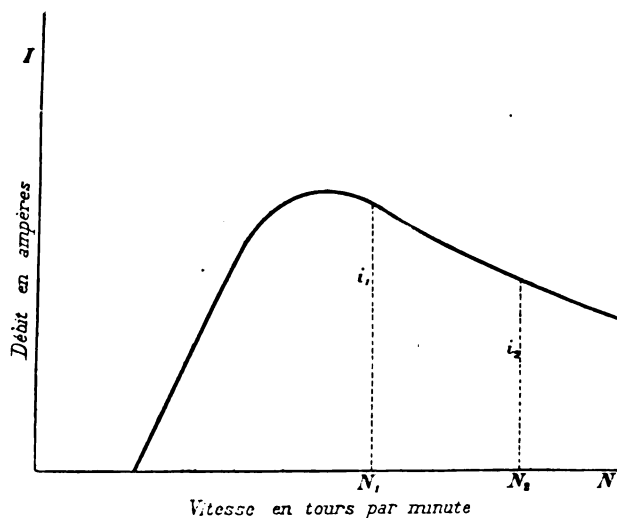


Fig. 3. — Caractéristique de la dynamo à trois balais et indication de la partie N_1 N_2 de la courbe utilisée pour le réglage.

bornes une tension constante de 1 500 volts, quelle que soit la vitesse.

» L'application de la formule donnée par M. Bethenod permet

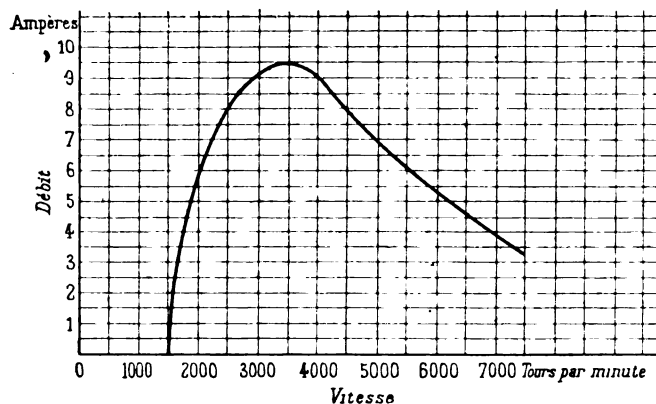


Fig. 4. — Intensité du courant de la dynamo à trois balais en fonction de la vitesse.

de faire coïncider les caractéristiques de débit de l'excitatrice, au cas où la tension devrait être maintenue rigoureusement constante.

» La batterie d'accumulateurs nécessaire pour le fonctionnement de la dynamo à trois balais sert en outre à l'alimentation des

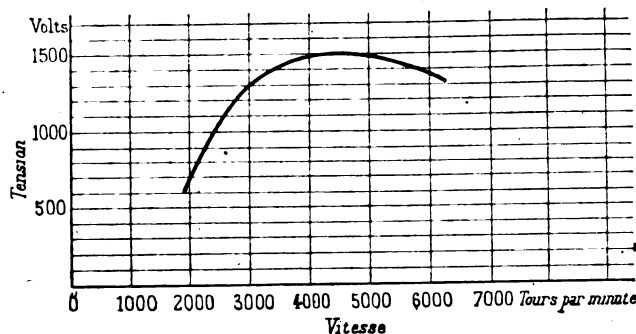


Fig. 5. — Valeurs de la tension aux bornes de la génératrice principale en fonction de la vitesse.

circuits de bord et à fournir l'énergie nécessaire au chauffage du filament de la lampe d'émission.

» Nous avons cru intéressant de signaler à nos collègues cette

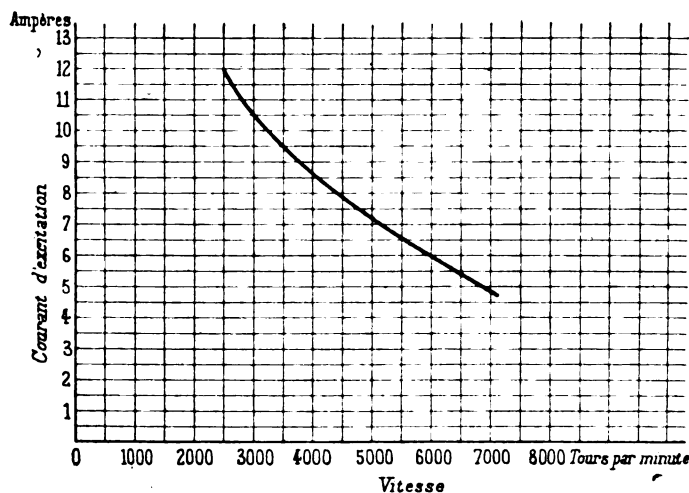


Fig. 6. — Forme d'intensité du courant fourni par la dynamo à trois balais aux inducteurs de la génératrice principale pour que la tension de celle-ci soit indépendante de la vitesse.

application heureuse de la dynamo à trois balais et qui montre le parti qu'il est possible d'en tirer pour résoudre tout problème de régulation et d'application à l'équipement électrique des véhicules de toutes sortes. »

M. le PRÉSIDENT remercie MM. Bethenod et Iglésis.

Résultat des élections

Le dépouillement du scrutin étant terminé, M. le PRÉSIDENT en proclame les résultats, après avoir remercié les scrutateurs.

Suffrages exprimés	376
Bulletins nuls	0
Majorité	189

Sont élus :

Président pour l'Exercice 1923-1924

MM.

NOMBRE DE VOIX
OBTENUES

ESCHWEGE (P.), Directeur de la Société d'Eclairage et de Force par l'Electricité	371
--	-----

Vice-Présidents

LEBAUPIN (G.-L.), Chef du Laboratoire d'Electricité des Chemins de fer de l'Etat	374
PARODI (H.), Chef des Services techniques du Matériel et de la Traction de la Cie des Chemins de fer d'Orléans	374

Secrétaire général

LEBLANC (Maurice) fils, Directeur de l'Usine de la Westinghouse-Leblanc	376
---	-----

Trésorier

MEYER (Marcel), Directeur de la Compagnie générale de Travaux d'Eclairage et de Force	375
---	-----

Secrétaires

BOSSU (P.), Ingénieur en chef de la Société anonyme des Etablissements Blériot	376
SANDSTROM (R.), Ingénieur-conseil	375

Membres

Pour trois ans

BACHELLERY (A.), Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction aux Chemins de fer du Midi	376
BLONDIN (J.), Directeur de la Revue générale de l'Electricité..	375
BRETON (J.-L.), Membre de l'Institut	375
BROCA (A.), Agrégé de la Faculté de Médecine	374
CAUDRELIER (E.), Ingénieur de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Electricité	376
DARRIEUS (G.), Ingénieur à la Compagnie Electro-Mécanique....	376
DENNERY (A.), Inspecteur général des Postes et Télégraphes, Directeur de l'Ecole supérieure des Postes et Télégraphes	374
DURAND (A.), Sous-directeur adjoint du Laboratoire central d'Electricité	376
GRATZMULLER (L.), Ingénieur en chef du Service de traction électrique à la Société alsacienne de Constructions mécaniques	373
LOCHERER (J.), Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées....	375
MILDE (Ch.) Gérant de la Maison Mildé et Cie	373
PEROT (A.), Professeur de Physique à l'Ecole Polytechnique..	374

RATEAU (A.), Membre de l'Institut, Président du Conseil de la Société Rateau	375
RECHNIEWSKI (W.-C.), Ingénieur	373
SAGET (J.), Ingénieur-conseil de la Société de Purification industrielle des gaz	375
TAINTURIER (C.), Ingénieur principal des Services électriques Chemins de fer de l'Etat	375

Pour deux ans

DUTILH (H.), Ingénieur, Constructeur d'appareils de mesures électriques	273
---	-----

Pour un an

GRANAT (E.), Ingénieur-constructeur, fournisseur de la Guerre et de la Marine	273
---	-----

Commission des Comptes

CORNUAULT (A.), Directeur de la Compagnie Continentale pour la fabrication des compteurs	375
GUERY (F.), Ingénieur en chef des services électriques de l'Omnium Lyonnais des chemins de fer et tramways	375
DE VALBREUZE (R.), Administrateur-délégué des anciens Etablissements Deberghe et Lafaye	375

Membre d'honneur

KENNELLY, Membre de l'Université Harvard, Professeur au Massachusetts, Institut of Technology	375
---	-----

ALLOCUTION DE M. Jean REY, *Président sortant*

M. Jean REY. — « Messieurs, au cours de l'année sociale qui s'achève, l'activité de notre Société a continué d'une manière satisfaisante.

» Les sujets les plus variés ont été traités dans nos séances mensuelles et, à cet égard, nous devons des remerciements, non seulement à ceux de nos membres qui sont venus nous apporter leurs travaux personnels ou nous en signaler d'autres, mais également à notre Secrétaire général, M. Maurice Leblanc, dont le zèle et l'activité sont au-dessus de tout éloge. Je n'oublie pas, bien entendu, notre excellent Secrétaire, M. Jouvion.

» A ce propos, veuillez remarquer que nos petites feuilles de convocations pour les séances renferment maintenant une note explicative résumée sur les Communications qui nous seront faites, ainsi que divers autres renseignements, notamment sur les programmes des séances des Sociétés similaires, telles que la Société des Ingénieurs civils de France et la Société d'Encouragement à l'Industrie nationale. Il y a là une innovation due à nos excellents collaborateurs, et pour laquelle nous devons leur témoigner notre gratitude.

» Depuis la dernière séance annuelle, nous avons eu à déplorer la perte de notre Trésorier, M. Brocq, perte qui a excité chez tous d'unanimes regrets. Nous venons de nommer, en son lieu et place, M. Marcel Meyer, ancien Président du Syndicat professionnel des Industries électriques, et nous le remercions bien sincèrement d'assumer cette tâche si importante pour la bonne marche de notre Société.

» Nous avons eu l'avantage de pouvoir lui donner comme collaborateur M. Délions, ancien Elève de l'Ecole Polytechnique, que nous avons nommé Administrateur ; il nous avait déjà apporté son concours du vivant de M. Brocq, et il a bien voulu accepter de le continuer sous une forme plus complète.

» Nous devons remercier particulièrement M. Délions de ses soins pour la gestion des fonds de notre Société, en qualité de Trésorier suppléant. Vu sa compétence en cette matière délicate, vous avez pu remarquer des progrès sensibles dans les revenus de nos disponibilités, et je suis heureux d'en remercier M. Délions en votre nom à tous.

» Le Laboratoire central d'Electricité a continué son labeur si

utile aux intérêts généraux de l'industrie électrique, et je puis ajouter que de grandes administrations, comme notre Marine de guerre, viennent de lui demander de leur apporter un concours encore plus large que par le passé.

» J'en viens maintenant à l'Ecole supérieure d'Electricité. Il me semble qu'elle vient de franchir un pas important.

» Tout d'abord, l'Université de Paris, par l'intermédiaire de M. Appell, son Recteur, auquel nous devons beaucoup de reconnaissance, a pu obtenir, avec l'appui bienveillant de M. Coville, Directeur de l'Enseignement supérieur, la création définitive à la Faculté des Sciences, d'une chaire d'électrotechnique générale, occupée par notre éminent Directeur à l'Ecole supérieure d'Electricité. Cette création, qui vous avait été annoncée l'année dernière par notre Président, M. Abraham, a reçu depuis lors la sanction définitive d'un crédit voté par les Chambres et qui sera inscrit désormais au budget de l'Université.

» Mais, il y a plus : le mouvement inauguré, il y a deux ans environ, par notre ami, M. Geoffroy, membre de notre Comité, pour obtenir de l'industrie électrique française les fonds nécessaires à l'agrandissement de l'Ecole supérieure d'Electricité, a pris corps. Beaucoup d'entre nous croyaient ce grand projet d'aboutissement impossible, mais, sous l'influence de M. Geoffroy et, je puis le dire, de la confiance qu'il nous a communiquée à tous, un groupement s'est créé parmi les membres de notre Comité et les principaux industriels, constructeurs-électriciens ou producteurs d'énergie électrique. Les voies et moyens pour l'obtention des 12 millions de francs qui nous sont nécessaires pour cette grande œuvre, ont été étudiés et un premier appel vient d'être fait, dans toute la France, par l'Association amicale des Ingénieurs sortis de l'Ecole supérieure d'Electricité, sous l'impulsion de son excellent Président, M. Cellerier.

» Lors du banquet dont cette Association a repris la tradition, au mois de décembre dernier, nous avons pu exposer notre projet devant un public sympathique qui ne nous a pas ménagé les encouragements. Depuis lors, un certain nombre de nos grandes maisons ont déclaré qu'elles adhéraient à ce mouvement et nous apportaient leur concours effectif. Nous avons la conviction que, d'ici peu, lorsque la souscription, de conditions bien définies, sera lancée dans le Pays, auprès de ceux qu'intéresse l'avenir de l'électricité, elle sera bien accueillie. Nous atteindrons ainsi ce but si

nécessaire, l'établissement définitif de l'Ecole supérieure d'Electricité dans un immeuble suffisamment large et proportionné au développement remarquable qu'elle a pris depuis quelques années.

» Il me reste maintenant, Messieurs, à confier les fonctions présidentielles auxquelles vous m'avez appelé et qui resteront l'un des plus grands honneurs de ma vie, à ce savant éminent que vous avez élu à l'unanimité, M. Marcel Brillouin, Membre de l'Institut, Professeur au Collège de France.

» J'aurais voulu vous retracer l'œuvre considérable d'un des plus grands de nos physiciens, mais il faudrait pour cela une voix plus autorisée que la mienne et un temps dont je ne dispose pas.

» Je dois néanmoins vous rappeler que les travaux de M. Brillouin s'étendent, on peut le dire, sur toutes les branches de la physique ; il est peu de sujets qu'il n'ait abordés dans une vie d'un labeur extraordinairement fécond.

» En physique mathématique, M. Brillouin s'est attaché à certains problèmes particuliers tels que l'intégration des équations linéaires aux dérivées partielles employées pour l'étude du champ de gravitation, de la propagation de la chaleur, de l'élasticité et du champ électromagnétique. Il s'est attaché notamment aux déterminations de l'étude des milieux dans lesquels sont plongés des corps limités, aux frontières desquels les phénomènes prennent une toute autre allure.

» En hydrodynamique, il a fait de nombreux travaux sur les mouvements tourbillonnaires et il a précisé plusieurs des théories dues à Helmholtz et Kirchhoff. Ses travaux sur les fluides l'ont conduit à diverses études sur la navigation aérienne et les aéroplanes dont une des premières remonte à l'année 1895.

» En physique théorique ou expérimentale, M. Brillouin a approfondi les actions moléculaires et notamment la théorie de l'élasticité et celle des phénomènes irréversibles qui présentent de si grandes difficultés, tels que la viscosité, les déformations permanentes, les frottements des solides, la résistance des fluides et, notamment, la structure des métaux, sujets dont l'art de l'Ingénieur ne saurait assez se préoccuper.

» En ce qui concerne les gaz, M. Brillouin a étudié expérimentalement leur diffusion et a réalisé, à cet effet, des appareils fort ingénieux. Il a pu ainsi faire progresser la théorie cinétique des gaz ainsi que celle de la viscosité.

» En thermodynamique, dans la théorie de l'élasticité, en optique, enfin dans l'électricité théorique et appliquée, M. Brillouin n'a cessé d'apporter une contribution toujours plus importante. Il m'est impossible de vous donner ici, même sommairement, une liste de ses nombreux Mémoires.

» Je termine, toutefois, en vous signalant une des applications originales de ses études à la gravitation par la construction d'un appareil perfectionné de celui d'Eotvos, permettant la mesure rapide et très exacte de l'ellipticité du géoïde terrestre en un point quelconque de la terre. Cet appareil, notamment, a permis d'étudier la variation de la courbure du géoïde dans le tunnel du Simplon, en 1905.

» Enfin, ses études sur les gaz secs ou humides et leurs surfaces de discontinuité ont conduit M. Brillouin à des vues très intéressantes sur la météorologie et, notamment, les conditions locales des courants atmosphériques et leurs perturbations.

» Notre Société est donc particulièrement heureuse de se voir présidée par un homme qui fait honneur à la science française et qui a tant ajouté au rayonnement scientifique de notre Patrie dans le monde entier.

» Mon cher Président, je vous transmets mes fonctions avec le sentiment qu'elles ne pouvaient être confiées à des mains plus expertes et plus autorisées. »

M. Marcel Brillouin, Président entrant, prend place au fauteuil, et dans une improvisation pleine d'humour, remercie ses collègues de l'avoir appelé à diriger leurs travaux.

La séance est levée à 22 heures 15.

LES COMPTEURS A TARIFICATION HORAIRE VARIABLE

L'emploi des compteurs à tarification variable est de nature à permettre des prix réduits pour l'utilisation à certaines heures et dans certaines conditions de l'énergie résiduaire provenant de la variation de débit sur de nombreuses chutes aménagées. Une solution de ce problème est fournie par le compteur Mahl, qui donne l'enregistrement du courant consommé et de la somme à payer, ainsi qu'une indication variable du prix à l'heure considérée. Cet organe complémentaire peut s'adapter à tous les systèmes de compteurs électriques, et même à des compteurs à eau et à gaz.

M. MAHL. — « L'extension du réseau général des distributions d'électricité rend de plus en plus pressante la nécessité de réduire les dépenses d'installation et d'exploitation en vue de pouvoir offrir le bénéfice de l'énergie économique aux besoins les moins à même de supporter des tarifs prohibitifs.

» Il ne convient plus aujourd'hui de laisser écrémer la richesse des sources de puissance, en réalisant des installations qui ne permettent tout au plus, comme par exemple à Jonage, d'utiliser qu'un dixième de la ressource locale pour l'ensemble de l'année, le reste étant à jamais sacrifié, si on ne transforme pas la totalité des installations.

» Les Suisses nous donnent en ce moment la mesure de l'ampleur à donner pratiquement aux installations au mieux de l'intérêt général : pour tirer un parti convenable d'un aménagement ne comportant qu'une puissance moyenne de 40 000 kw à Guttannen, on a décidé de réaliser une puissance installée de 120 000 kw pour ne rien avoir à regretter dans la suite du côté de l'utilisation des eaux résiduaires de la fonte des neiges.

» Il en est de même pour la force d'Innerkirchen, où on vient d'installer une puissance de 90 000 ch en vue d'exploiter une puissance moyenne de 30 000 ch. Dans ces conditions, l'ensemble de ces deux aménagements doit assurer une production d'énergie de 600 millions de kw-h par an.

» A Olten, où la situation se prête à une dérivation économique, à la faveur surtout d'un raccourci de l'Aar, l'installation est faite en vue de l'emploi de 350 m³ à la seconde, alors que le débit n'est que de 100 m³/s, et que le débit maximum utilisé ne se justifie en moyenne que durant 120 jours par an.

» Nous allons plus loin : à notre avis, dans certains cas, il convient de se ménager la faculté de tirer parti des eaux de crues, alors même qu'elles ne seraient assurées que deux ou trois mois par an ; car, mieux qu'en Suisse, nous pouvons envisager plus de

régularité dans la moyenne de la puissance distribuée, grâce à la suppléance que favorise sur notre réseau général les deux régimes glaciaire et jurassique de cours d'eau dont les étiages se présentent sensiblement à deux moments opposés de l'année.

» Dans l'aménagement à l'aide de barrages successifs des cours d'eau, il sera toujours possible d'assigner une date où l'extension de la puissance installée se justifiera économiquement ; tandis que dans le cas de dérivations, on appréhendera toujours d'avoir à modifier le gabarit du canal, chose généralement plus coûteuse que sa reconstruction.

» La digression suivante, que nous nous permettons du côté des méthodes d'aménagement des sources d'énergie, a pour but de montrer quelle part de la richesse publique serait à jamais sacrifiée, si on suivait les errements trop fréquents qui ne veulent envisager que les besoins immédiats ou la moindre dépense dans les projets d'aménagement des cours du domaine public.

» Comme exemple, toutes les autorités en la matière, l'Administration en tête, conviennent que l'énergie récupérable annuellement sur l'ensemble du Rhône français peut atteindre 14 milliards de kilowatts-heure ; cependant, les projets administratifs actuellement connus n'envisagent la possibilité de tirer parti que du quart environ de cette énergie par la méthode des canaux de dérivation. Or, le fait est prouvé, ce moyen ne peut être payant, alors même qu'on limite le rôle des canaux à celui, étriqué déjà, rempli par Jonage qui n'utilise qu'un volume constant de l'eau moindre que celui d'étiage.

» La méthode d'aménagement par barrages successifs assure la récupération totale avec une dépense infiniment moindre en capital et en frais d'exploitation par kilowatt installé et par kilowatt-heure produit : les exemples offerts par les installations sur le haut Rhône suisse et franco-suisse, le haut Rhin, le Mississipi, les fleuves canadiens, etc., en fournissent des preuves multiples ; pourquoi alors s'obstiner à parler de dérivations quand on peut s'en passer avantageusement !

» La navigation a tout à gagner de pouvoir être exercée sur des biefs larges comme le fleuve, au lieu d'être réduite à une vitesse quatre fois moindre dans des canaux mixtes dont le principe est condamné par tous les vrais techniciens et même discuté dans le rapport du Conseil supérieur des Travaux publics (mars 1919).

» Enfin, les irrigations ne peuvent être que favorisées si elles

sont rendues possibles au bénéfice des deux rives à la fois, chose interdite dans le cas d'une dérivation.

» L'énergie résiduaire, seulement récupérable économiquement au moyen des barrages successifs, peut pour le Rhône représenter plus des deux tiers de la production annuelle ; mais comment placer cette énergie inconstante d'une valeur moindre que celle permanente ? A la faveur d'une tarification variable avec la puissance saisonnière disponible et la charge horaire sur les lignes primaires.

» Pour satisfaire équitablement au marché de cette énergie, il convient de disposer du moyen permettant de l'offrir d'une manière uniforme à toute la clientèle éventuelle qui, avant d'entreprendre de nouvelles industries, pourra tabler sur un prix de revient certain, d'un intérêt souvent capital pour elles, celui de l'énergie électrique.

» Une réserve de l'eau est généralement impossible à réaliser sur une dérivation ; elle présente rarement une ressource appréciable sur les retenues successives des cours d'eau canalisés ; d'où il résulte que la production horaire quotidienne de l'énergie sera à peu près uniforme, et son placement, durant les heures de nuit, ne se réalisera qu'à la faveur de tarifs très économiques permettant, par exemple, d'effectuer des pompages peu onéreux, en vue des irrigations, de faire de l'électro-métallurgie ou des produits chimiques, etc.

» Les lignes de distribution gagneront beaucoup à recevoir ainsi une utilisation aussi permanente que possible de leur capacité de transport, ce qui dégrèvera les frais pour chaque unité vendue.

» Afin de faire varier le prix horaire de vente de l'énergie, on a déjà proposé divers systèmes de change-tarifs réglés par un mouvement d'horlogerie comportant, par exemple, des harnais d'engrenages assurant 2, 3 et même 4 vitesses différentes aux organes d'enregistrement du prix de l'énergie consommée. D'autres appareils comportent des résistances électriques variables agissant sur les organes d'enregistrement ; certains moyens produisent des interruptions périodiques plus ou moins longues suivant l'heure de l'enregistrement. Enfin, on a proposé de produire sur les lignes des pulsations, d'ailleurs bien aléatoires, devant troubler l'exploitation pour agir sur les appareils d'enregistrement, et aussi l'établissement de fils pilotes venant actionner à des heures déterminées les change-tarifs.

» Nous ne nous permettrons pas de discuter les mérites des procédés connus. Disons simplement que le moyen à préférer doit remplir le plus grand nombre possible des conditions suivantes :

» 1° Etre économique et d'application facile à tous les systèmes de compteurs, sans impliquer des installations encombrantes ;

» 2° Se prêter en principe à une justification du prix variant absolument avec la courbe de la charge sur la ligne de distribution, pour que le prix le plus fort s'enregistre au moment où la consommation est la plus active sur le réseau à l'heure de la pointe;

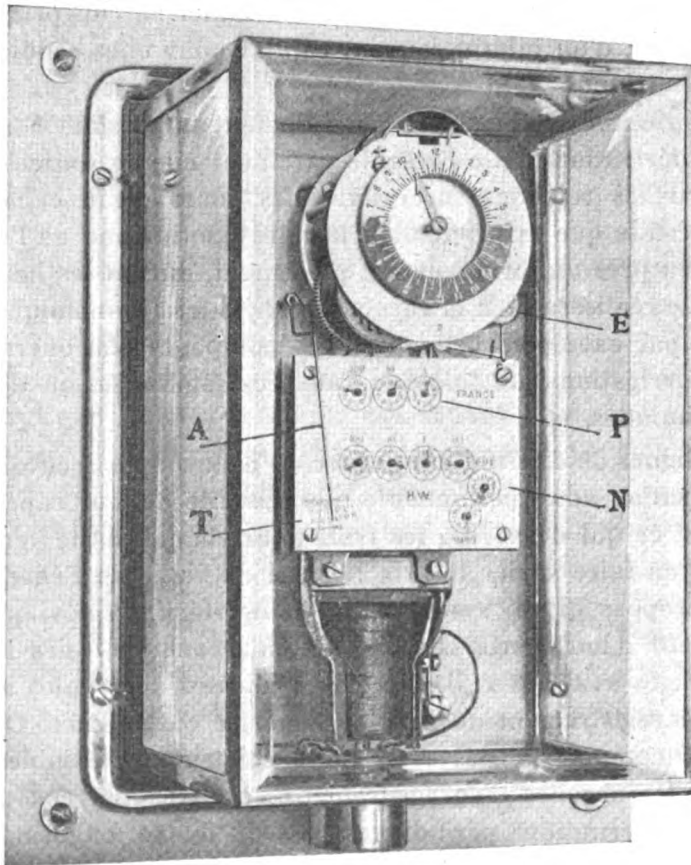


Fig. 1. — Vue de l'appareil Mahl s'adaptant aux compteurs ordinaires et permettant de modifier le tarif suivant la charge actuelle du réseau.

» 3° Se prêter à un contrôle de tous les instants sur la rectitude de la marche et celle du prix enregistré;

» 4° De permettre éventuellement, dans des cas particuliers, une modification facile de la tarification horaire et, au besoin, être mis à un tarif uniforme, mais que toute modification soit nettement apparente pour l'usager ; en tous les cas, de ne pas créer des obligations de variations uniformes sur le réseau tout entier ;

» 5° De se prêter à des variations horaires quotidiennes du prix pouvant aller du simple au décuple, et susceptibles d'être modifiées encore avec les saisons pour des consommations importantes, des distributions primaires ou secondaires, etc.

» Le système que nous avons présenté déjà depuis longtemps, pas plus que tous ceux connus à ce jour, n'ont reçu, pour des raisons diverses dont surtout une coupable incurie, l'accueil qu'ils méritaient, afin que les distributions d'énergie, dès leur essor, ne se confinent pas dans la charge de fournir un éclairage de luxe et desservent mieux l'atelier familial et les besoins ruraux.

DESCRIPTION DU SYSTÈME MAHL

» Cet organe, qui complète commodément tous les systèmes de compteurs, comporte une minuterie et deux cadrans P et N (fig. 1) donnant l'un le nombre d'ampères-heure ou d'hectowatts-heure

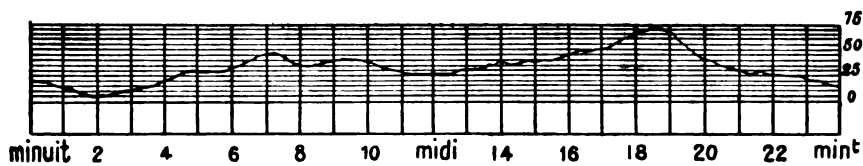


Fig. 2. — Courbe moyenne du courant de la distribution pour une durée de vingt-quatre heures.

consommés et l'autre, la somme en francs due par le client pour sa consommation, somme calculée et modifiée à chaque instant, d'après un tarif variant avec la charge sur la ligne de distribution. Cette modification du tarif est assurée par une came dont les rayons vectoriels varient en longueur comme les ordonnées de la courbe moyenne de l'enregistreur du courant de la distribution durant 24 heures (voir l'exemple fourni par la fig. 2). En accomplissant une révolution par 24 heures, cette came soulève plus ou moins un coin qui est disposé entre une bielle actionnée par le compteur et un cliquet agissant sur le rochet entraînant le mouvement marquant la dépense en francs : on comprend que, si le coin est plus ou moins engagé, il détermine la poussée d'un nombre variable de dents du rochet et, partant, fait marquer une dépense différente sur le cadran, suivant l'heure de la marche.

» Lorsqu'on veut modifier les conditions de la variation du prix, on n'a qu'à changer la came.

» Une aiguille spéciale A, dont la position varie avec celle du coin, indique à chaque instant, sur une échelle T, le prix du courant d'après le tarif convenu, pour l'ampère-heure ou l'hectowatt-heure. Rien ne s'oppose à ce que ce compteur soit doté d'un cylindre enregistreur portant un crayon marquant la consommation horaire et un autre crayon traçant la courbe de la variation horaire du prix.

Si, par suite de raisons spéciales, il n'y a pas lieu de faire bénéficier le client du tarif réduit, au moment de la faible consommation générale sur la distribution, le rôle de la came est annihilé, l'aiguille A est maintenue vers les prix forts et ne peut descendre au-dessous d'un minimum déterminé, grâce à un excentrique E qui empêche le coin de remplir son rôle.

» Il est loisible, d'après le nombre de kilowatts-heure ou d'ampères-heure marqués, de se rendre compte à chaque instant de la part de la dépense afférente à chaque unité consommée.

» La seule sujétion pour l'établissement d'un tel compteur est d'indiquer la variation quotidienne de la consommation sur le réseau en vue de réaliser la came qui convient.

» Comme le montre la description qui précède, l'appareil est d'une extrême simplicité de construction, d'entretien et de fonctionnement. Il est des plus économiques à appliquer et des plus sûrs au point de vue de l'exactitude.

» Cet appareil, dont l'intérêt n'échappa pas à M. Michel et à nos regrettés collègues Frager et Brocq, fut réalisé à la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, sous la direction de notre collègue M. Blanchet et du soussigné en moins de douze jours; chose qui fait autant honneur aux initiateurs qu'elle justifie la simplicité du système.

» Pour conclure, aujourd'hui où il convient de mettre méthodiquement en valeur toute la force pratiquement récupérable sur chaque source d'énergie, il nous paraît d'une extrême opportunité que notre Société exprime aux Pouvoirs publics le vœu qu'en prenne souci de vulgariser l'emploi du change-tarif, qu'on en impose même l'usage afin de faire cesser la situation abusive actuelle, dont pâtit l'intérêt général, qui livre au bon plaisir des exploitants des réseaux à peu près toute latitude de dégrèvement de tarif dans la vente de l'énergie résiduaire. »

REMARQUES SUR LA COMMUNICATION DE M. LANGEVIN ⁽¹⁾

M. Henri ABRAHAM. — « Je demande à présenter quelques observations au sujet de la proposition faite par le Comité électrotechnique d'exprimer les valeurs des champs magnétiques et les valeurs des inductions magnétiques en les rapportant respectivement à une unité qui porterait un nom différent, selon que l'on mesurerait un champ ou une induction.

» *Je considère cette proposition comme actuellement inacceptable parce que un champ magnétique et une induction magnétique sont, par définition, des grandeurs de même espèce.* Si l'on veut changer quelque chose, ce sont les *définitions* des termes eux-mêmes, champ et induction, qu'il faudra changer.

» Dans les traités classiques d'électricité, même les traités récents, publiés en France ou à l'étranger, on trouve, en effet, d'une manière générale, les définitions suivantes :

» On appelle champ magnétique en un point de la masse d'un corps magnétique (le fer), le champ qui serait mesuré dans une cavité cylindrique très petite creusée dans la masse autour de ce point et qui serait infiniment déliée dans le sens de l'intensité d'aimantation. »

» On appelle induction magnétique en un point de la masse du fer le champ qui serait mesuré dans l'intérieur d'une cavité analogue mais très aplatie dans le sens de l'aimantation. »

» Cela veut dire, en gros, que l'induction est le champ que l'on analogue mais très aplatie dans le sens de l'aimantation.

» D'après ces définitions, dont l'origine remonte à Maxwell, un champ et une induction sont des quantités de même espèce. Il en est nécessairement de même de leurs unités, et il n'y a pas plus d'intérêt à donner à ces unités des noms différents qu'à distinguer un stère d'un mètre cube, ou à donner au mètre carré le nom de centiare pour la mesure de la surface d'un champ.

» La seule question qui puisse se poser est de savoir si les définitions généralement adoptées, qui viennent d'être rappelées, doivent être abandonnées, et ce que l'on voudrait mettre à leur place.

» Pour le moment, je considère que ces vieilles définitions sont encore acceptables, parce que je n'ai pas connaissance qu'aucun

⁽¹⁾ Communication sur « Les unités de mesures électriques » faite à la séance du mercredi 1^{er} mars 1922.

fait expérimental fasse ressortir une contradiction, ni en ce qui concerne les conditions générales de symétrie, ni en ce qui concerne les lois quantitatives des phénomènes électriques.

» Dans le très élégant exposé que M. Langevin a développé, les définitions du champ et de l'induction sont présentées d'une manière nouvelle, du moins en apparence, car il n'est pas bien certain que les définitions de M. Langevin soient, au fond, distinctes des définitions de tout à l'heure : un examen approfondi sera nécessaire.

» Le Comité électrotechnique, dont nous avons la bonne fortune de voir le Président assister à cette séance, a sans doute aussi adopté des définitions nouvelles, mais nous ne les connaissons pas encore, et nous ne pouvons pas les confronter avec les anciennes définitions et avec celles que propose M. Langevin, pour savoir si toutes ces définitions de grandeurs ne sont pas équivalentes en ce sens qu'elles conduiraient toujours à des valeurs numériques identiques.

» Si, au contraire, les définitions que M. Langevin propose ou celles du Comité électrotechnique, doivent conduire à la considération de grandeurs réellement nouvelles, distinctes du champ ou de l'induction magnétiques, dont nous avons rappelé plus haut les définitions, il deviendra nécessaire de changer, non seulement les noms des unités, mais de changer aussi les noms des grandeurs elles-mêmes, si l'on veut éviter une confusion intolérable.

» Je pense, enfin, que, s'il y avait des décisions aussi importantes à prendre, il ne suffirait pas d'une simple décision du Comité électrotechnique. Il faudrait, d'abord, un exposé qui puisse être discuté et sur lequel un accord puisse se faire pour être ensuite sanctionné par un Congrès international. »

M. E. BRYLINSKI. — « Au cours de son intervention, notre ancien président, M. Abraham, m'a posé quelques questions auxquelles je viens répondre par écrit, l'heure tardive m'ayant empêché de le faire en séance.

» Je tiens, tout d'abord, à rassurer M. Abraham sur l'état d'esprit des membres du Comité électrotechnique français, qui ont demandé que des noms différents fussent attribués aux unités de champ et d'induction magnétiques. Aucun d'eux n'a eu l'idée de réclamer deux noms différents d'unité pour une même grandeur magnétique qu'on appellerait tantôt champ et tantôt induction ;

ils considèrent qu'il y a les plus grandes probabilités pour que le champ et l'induction soient réellement deux grandeurs physiques distinctes, de ces grandeurs qui interviennent par paires dans tous les domaines de la physique lorsqu'il faut exprimer l'énergie totale ou par unité de volume, et qu'on voit agir les unes par leur intégrale de ligne, les autres par leur flux à travers une surface.

» Ils croient même, en adoptant cette manière de voir, poursuivre la tradition du Congrès international de 1893 (Chicago) qui a enlevé à l'unité de self-inductance le nom de *quadrant* qui lui avait été donné au Congrès de 1889 (Paris) pour lui donner celui de *henry*.

» La self-inductance a, en effet, pour expression :

$$L = \frac{1}{i} \int_S dH dS,$$

alors que la force magnétomotrice du circuit est, en intégrant le long d'une ligne de force :

$$\int_l H dl = 4\pi i.$$

De sorte qu'on a finalement :

$$L = 4\pi\mu \frac{\int_S H dS}{\int_l H dl},$$

d'où résulte que, pour que la self-inductance ne soit pas de nature d'une longueur, il faut admettre que μ n'est pas un pur nombre.

» On pourrait remarquer que, si l'on donne suite à une très judicieuse remarque de M. Daniel Berthelot en exprimant dans les équations de dimension les longueurs par X, Y, Z, au lieu de les confondre dans l'unique notation L, on aura, en dimensions:

$$L = \mu XYZ^{-1}$$

ce qui, même en donnant à μ des dimensions nulles, ne constituerait pas une longueur et suffirait à justifier le changement de dénomination adopté en 1893. Mais ces considérations très délicates, qui commencent à peine à se répandre aujourd'hui, n'étaient pas connues il y a trente ans et n'ont assurément pas été la cause de ce changement de dénomination.

» Je me sens maintenant obligé de faire connaître mes définitions du champ et de l'induction magnétiques. Si je ne l'ai pas fait encore, c'est que je crains que ces définitions ne soient pas *mes* définitions, mais celles d'à peu près tout le monde. Depuis trente-cinq ans que je réfléchis à ces questions, j'ai cherché à m'assimiler les indications que j'ai reçues de maîtres incontestés, et il m'est impossible aujourd'hui de discerner quelle est exactement leur part et quelle est la mienne dans ma manière actuelle de penser ; je crains bien que ma part dans les définitions en question ne soit sensiblement nulle, mais je ne saurais me dispenser de donner à M. Abraham le renseignement qu'il a bien voulu me demander d'une manière pressante.

» Pour moi, l'outil d'exploration du champ magnétique est l'aiguille aimantée, courte et très fine. Cette aiguille doit être assez fine pour se rapprocher aussi parfaitement que possible du moment magnétique théorique, composé de deux pôles magnétiques égaux et de signes contraires rigidement accouplés.

» On a objecté à l'emploi de l'aiguille aimantée que, si l'on prend un aimant de dimensions comparables dans tous les sens, les phénomènes que manifeste cet aimant sont assez différents de ceux qu'on constate avec une aiguille très fine.

» J'estime que l'objection ne porte pas, car les phénomènes auxquels il est fait allusion résultent d'aimantations induites qui peuvent plus ou moins aisément se calculer, de sorte qu'on n'en saurait tirer aucune conclusion de nature à modifier les résultats obtenus au moyen d'une aiguille très fine. La direction de l'aiguille est celle du champ ; l'intensité du champ se déduit de la période d'oscillation de l'aiguille oscillant librement autour de son centre de gravité.

» Envisageons dès lors un courant rectiligne indéfini i placé dans un milieu isotrope indéfini. On constate qu'en chaque point de ce milieu existe un champ magnétique perpendiculaire au plan passant par le point et le fil, proportionnel à i et inversement proportionnel à la distance r du point au fil,

$$H = \alpha \frac{i}{r},$$

On constate, de plus, et c'est là un résultat expérimental qui me paraît au-dessus de toute contestation, que ce coefficient α' est indépendant à la fois de la nature du fil et de la nature du milieu. L'équation ci-dessus étant l'équation de définition du champ,

il y a tout intérêt, dans un but de simplicité parfaitement licite, à envisager ce coefficient constant α comme étant purement numérique.

» Si l'on arrive maintenant au cas d'un courant fermé quelconque, il y a deux manières de procéder.

» On peut se servir de la formule élémentaire de Laplace :

$$H = \beta \frac{i \, ds \, \sin \alpha'}{r^2}.$$

» Cette formule, qui s'applique à un élément infiniment petit ds de courant, pure conception mathématique, ne correspond pas à une réalité physique et nous ne pouvons en contrôler que des intégrales définies. Mais toutes ces intégrales donnent des résultats confirmés par l'expérience, de sorte que l'emploi de cet outil mathématique commode apparaît comme parfaitement licite. Si on l'applique au cas du courant rectiligne indéfini, on voit que

$$H = 2 \beta \frac{i}{r},$$

et que, par conséquent, le coefficient β est un coefficient numérique que l'on peut prendre, et que l'on prend effectivement égal à 1.

» On peut également suivre une ligne de force ; on constate que ces lignes de force se ferment autour du conducteur et que l'intégrale du champ le long d'une ligne de force est proportionnelle au courant i

$$\int H \, dl = \gamma i.$$

» Si l'on applique cette manière de procéder au courant rectiligne indéfini, on voit immédiatement par les considérations de symétrie que les lignes de force sont des circonférences ayant le pied de la perpendiculaire sur le fil comme centre, et que le champ est constant le long d'une ligne de force, de sorte que

$$\int H \, dl = 2 \pi r H = 2 \pi \alpha i = \gamma i$$

et que, par conséquent, le coefficient γ est simplement égal à 4π , ce qui s'écrit :

$$\int H \, dl = 4 \pi i.$$

» C'est l'expression généralement employée. Certains auteurs,

Heaviside notamment, ont jugé ce facteur 4π gênant et l'ont fait disparaître par un choix convenable d'unités. C'est là un simple détail sur lequel il n'y a pas lieu de s'appesantir dans le présent exposé, car il n'influe en rien sur la nature du champ.

» Le champ magnétique est ainsi défini ; quand on dit que dans la pratique industrielle, le champ ne se déduit pas de l'aiguille aimantée, mais des courants, et que, par conséquent, la définition que je viens de donner ne correspond pas à celle de la pratique, on commet, je pense, une erreur d'appréciation. Il ressort, en effet, de l'exposé précédent, que l'aiguille aimantée n'y a été qu'un moyen d'investigation pour arriver à définir le champ magnétique en fonction du courant électrique, et qu'en dernière analyse je définis le champ par le courant au moyen de la force électromotrice de ce courant.

» L'induction magnétique se déduit pour moi, comme pour tout le monde, je crois, de la loi de la force électromotrice produite par une variation du flux d'induction

$$L = - \frac{dF}{dt},$$

dans laquelle n'intervient aucun coefficient parasite. On prend un circuit électrique plan assez petit pour que l'induction puisse être considérée comme constante dans l'intérieur du circuit et on le sort rapidement du champ, ou on le retourne brusquement.

» On mesure une force électromotrice totale

$$\int E dt = Bs$$

dans le premier cas et $2Bs$ dans le second cas. On peut par tâtonnements rechercher l'orientation pour laquelle cette force électromotrice totale est maximum, et l'induction est alors perpendiculaire au plan du circuit d'épreuve. On peut aussi, comme l'a montré M. Pomey, faire l'essai dans trois plans rectangulaires, et en déduire les 3 composantes B_x , B_y et B_z de l'induction.

» Le champ et l'induction étant ainsi définies, on en déduit l'intensité d'aimantation au moyen de la formule rappelée dans une autre enceinte par M. Paul Janet :

$$4\pi J = B - \mu_0 H,$$

qui est celle à laquelle on parvient en reprenant la théorie de la polarisation si on a le soin d'y rétablir la perméabilité μ du

milieu et la perméabilité μ_0 de l'éther partout où elles doivent figurer dans les formules. L'introduction de cette perméabilité μ_0 paraît d'autant plus indispensable que sa valeur dans les corps matériels n'est pas nécessairement la même que dans l'éther libre.

M. Pomey a proposé tout récemment d'arriver plutôt à l'aimantation par une formule de champ

$$4\pi J = \frac{B}{\mu_0} - H.$$

» Il serait prématuré de discuter dès aujourd'hui les mérites de cette proposition ; je me bornerai à signaler, d'accord avec M. Pomey, que cette nouvelle grandeur J ne serait plus l'intensité d'aimantation et que, par conséquent, il faudrait lui trouver une autre dénomination si l'on se ralliait à cette définition.

» Ces définitions me paraissent suffisantes pour traiter avec toute la rigueur scientifique les questions qui peuvent intéresser la technique. On peut cependant les trouver un peu simples lorsqu'on veut passer à l'étude scientifique pure, et dans ce cas je pense que les définitions de M. Langevin peuvent être adoptées. Il n'y a, d'ailleurs, pas de contradiction, autant que j'ai pu m'en rendre compte, entre ces deux groupes de définitions.

» Il me reste à montrer, pour achever ma tâche, que j'ai le droit d'appliquer le nom d'*induction* à la grandeur que j'ai définie sous ce nom, que je ne suis pas un révolutionnaire et qu'il n'est pas nécessaire de convoquer un congrès international pour entériner des décisions qui reviennent, en dernière analyse, à rectifier une écriture défectueuse de Maxwell.

» A la dernière séance, M. Abraham nous a dit, en effet, que Maxwell avait, en accord avec Lord Kelvin, défini, sous le nom d'*induction*, le *champ* magnétique mesuré dans une cavité large et plate, que dès lors je n'avais pas le droit d'appeler *induction* mon induction qui, n'étant pas un champ, n'était pas l'induction de Maxwell, qu'il faudrait au moins donner à cette grandeur un autre nom, si toutefois on se ralliait à la manière de voir que je partage avec M. Langevin, et que la révolution ainsi introduite serait tellement grave qu'il ne faudrait pas moins d'un congrès international pour la sanctionner.

» Je crois que les scrupules de M. Abraham sont excessifs.

» Tout d'abord, il convient de rappeler que Lord Kelvin n'a pas employé le mot d'*induction* ; il a donné simplement, au moyen de la cavité longue et mince, et de la cavité large et plate, deux défi-

nitions différentes de la *force magnétique*. Ce seul fait montre combien était imprécise à cette époque la signification de cette expression de *force magnétique* ; il est, en effet, inadmissible qu'une grandeur précise puisse être définie de deux manières donnant des résultats différents.

» Maxwell reprend la question. Il est tout au début de la théorie du magnétisme, c'est-à-dire en plein inconnu ; il l'aborde d'ailleurs au moyen de la formule de Coulomb sous la forme

$$f = \frac{m m'}{r^2},$$

ce qui lui masque l'influence de la perméabilité du milieu. Il a admis que les pôles magnétiques possédaient une certaine *force m* et appelé *force magnétique* la force mécanique subie par un pôle unité. Tout ceci est encore assez vague, il ne peut en être autrement au moment où l'on aborde l'étude d'une science, et ce n'est qu'au fur et à mesure des progrès de nos connaissances que les notions se précisent. Nous ne pensons pas qu'à ce stade de la théorie on puisse dire que l'expression *force magnétique* doive toujours être traduite par *champ magnétique* dans notre langage d'aujourd'hui.

» Maxwell définit l'intensité d'aimantation comme étant le moment magnétique par unité de volume. Envisageons, pour préciser, que l'aimant élémentaire dont on définit le moment magnétique soit un cylindre de longueur l et de section droite S , le magnétisme étant réparti sur ces deux sections. L'intensité d'aimantation sera :

$$J = \frac{m l}{S} = \frac{m}{s},$$

c'est-à-dire une densité superficielle de quantité de magnétisme ; c'est là d'ailleurs une définition classique.

» D'autre part, le champ dérive d'un potentiel, de telle sorte que le travail d'une quantité de magnétisme m qui sort du champ est égal à mV et que l'énergie magnétique d'un champ créé par des masses m a pour valeur :

$$\frac{1}{2} \sum m V.$$

» Si on applique cette formule à un élément de tube de force de longueur dl et de section dS , sur chacune desquelles est répartie

une quantité élémentaire de magnétisme $\pm dm$, cette valeur deviendra :

$$\frac{1}{2} dm H dl = \frac{1}{2} \frac{dm}{ds} H dl ds,$$

de sorte que l'énergie par unité de volume sera :

$$\frac{1}{2} H \frac{dm}{ds} = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B_0 H}{8\pi} + \frac{JH}{2}.$$

» On reconnaît ici l'expression générale de l'énergie qu'on trouve dans toutes les branches de la physique et où figurent deux éléments de nature essentiellement différente ; on peut en conclure que le champ et l'intensité d'aimantation sont des grandeurs de nature différente.

» Ceci posé, envisageons dans un corps magnétique une cavité composée d'une portion de tube de force limitée par deux sections orthogonales ; la création de cette cavité libérera fictivement sur les bases des quantités déterminées, égales et de signe contraire, de magnétisme. Si la cavité est longue et très étroite, les quantités fictives de magnétisme induit seront très faibles et auront peu d'influence ; le champ magnétique que l'on mesurera dans la cavité sera sensiblement égal au champ magnétique au même point dans le corps quand il n'y a pas de cavité. Si la cavité est quelconque, l'influence des quantités fictives induites dépendra de sa forme, et si, enfin, on envisage une cavité de grande surface et d'épaisseur très faible, les quantités fictives induites auront leur influence maximum. Ces résultats seraient troublants si l'on supposait que l'état intérieur pourrait être défini simplement par la valeur du champ magnétique en chaque point ; ils montrent qu'il n'en est rien, qu'il faut tenir compte de l'intensité d'aimantation du corps, et qu'on peut le faire en envisageant, en sus du champ, un vecteur dont Maxwell écrit l'expression sous la forme :

$$B = H + 4\pi J$$

et qu'il appelle *induction*.

» Il est évident que les champs magnétiques mesurés dans les cavités n'ont pas de sens par eux-mêmes, car il y a dans le corps un seul champ magnétique en chaque point ; leur mesure donne les valeurs *numériques* d'un ensemble plus complexe et il se trouve que, dans le cas de la cavité large et plate où l'on ne peut pas mesurer matériellement le champ en raison de la faiblesse de l'épais-

seur, mais seulement l'induction au moyen d'un circuit d'épreuve, la valeur *numérique* dans la cavité est celle de l'induction en ce point du corps. Si l'on pouvait mesurer le champ, sa valeur numérique serait encore la même ; mais cette concordance n'est ni l'effet du hasard, ni une loi naturelle qui doive éveiller l'attention ; elle résulte d'une simple convention, qui consiste à prendre pour unité de perméabilité celle de l'éther, et du fait que la perméabilité magnétique de l'air est extrêmement voisine de celle de l'éther.

» On voit au premier coup d'œil que l'écriture de la formule de l'induction n'est pas acceptable puisqu'elle compose ensemble un champ et une intensité d'aimantation que la considération de l'énergie magnétique par unité de volume nous a amenés à considérer comme de nature différente. Si l'on reprend la question en tenant compte de la perméabilité magnétique, on voit que cette erreur d'écriture provient simplement du fait que la perméabilité μ_0 de l'éther a été systématiquement remplacée par le nombre 1 et que, si on la rétablit partout où elle doit figurer, on obtiendra :

$$B = \mu_0 H + 4\pi J,$$

ce qui compare entre elles seulement des quantités de même nature.

» Après avoir défini de cette manière l'induction, en y introduisant une erreur qui peut s'excuser par le fait qu'on est alors au début de la théorie et qu'on n'y voit pas encore très clair, Maxwell n'hésite pas dans la suite à modifier son exposition ; il arrive également à la définition :

$$E = - \frac{dF}{dt}$$

qui est fondamentale, et ne donne pour B une définition compatible avec celle qu'il a adoptée au début que si l'on suppose a priori que la perméabilité magnétique est un pur nombre.

» Ainsi Maxwell donne pour l'induction deux définitions successives : l'une, placée au début de son exposé, à un moment où les idées ne peuvent encore être bien précisées, et qui suppose a priori que la perméabilité magnétique est un pur nombre, l'autre, qui vient à la fin de l'exposé, alors que les idées sont précisées, est absolument générale.

» C'est cette seconde définition que j'ai adoptée, à la suite de Potier et de Vaschy, et que tout le monde a adoptée, je crois. Il

me paraît difficile, dans ces conditions qu'il puisse être soutenu que j'emploie le mot *induction* dans un autre sens que Maxwell, qu'il faut adopter une autre dénomination pour cette nouvelle grandeur et qu'un Congrès international est seul qualifié pour sanctionner une révolution de cette importance.

» Les caractères propres de la perméabilité magnétique en font une fonction extrêmement complexe, et même il n'y a de perméabilité que dans des cas exceptionnels, la relations entre B et H étant en général une fonction compliquée qui s'écarte beaucoup de la simple proportionnalité. D'autre part, la considération de l'expression de l'énergie magnétique par unité de volume nous fait apparaître l'induction et le champ comme des grandeurs de nature différente. Il semble nécessaire, dans ces conditions, d'adopter des dénominations différentes pour les unités de ces grandeurs de nature différente, et l'on ne voit pas qu'un Congrès international solennel soit nécessaire pour entériner une conséquence aussi inéluctable de la différence qui apparaît, plus nettement aujourd'hui qu'autrefois, entre la nature de deux grandeurs physiques : induction et champ magnétiques.

» La discussion reste ouverte (et je n'ai pas l'intention de l'entamer aujourd'hui sur ces points, car je désire me borner à répondre aux questions pressantes que m'a adressées M. Abraham) sur les trois sujets suivants :

» 1° A laquelle des deux unités convient-il de réserver le nom de *gauss* ?

» 2° Quel nom peut-on proposer pour l'autre unité (le nom de *mascart* a été suggéré par M. Paul Janet pour l'unité de champ ; je crois que ce nom rallierait tous les suffrages) ;

» 3° La Commission électrotechnique internationale est-elle compétente pour prendre une décision sur ces deux points, alors qu'elle a été habituée à prendre des décisions dont la répercussion est beaucoup plus grave, ou doit-elle se borner à adopter provisoirement une solution en attendant de pouvoir la soumettre à la ratification d'un Congrès international, dont la composition serait sujette à des aléas que ne présente pas celle de la Commission électrotechnique internationale. »

M. Daniel BERTHELOT. — « Il me semble intéressant de rappeler que les problèmes relatifs aux unités électriques et aux équations de dimensions ont déjà été à plusieurs reprises, dans cette même salle, l'objet de débats approfondis. En janvier 1909, nous y avons entendu une communication d'un haut intérêt de M. Brylinski : « Quelques réflexions sur les systèmes de mesures », dont un des buts était précisément d'examiner s'il ne convenait pas de donner des noms différents à l'unité de champ et à l'unité d'induction. A la discussion qui suivit, prirent part notamment, MM. Janet, Pellat, Devaux-Charbonnel et moi-même.

» Quelques années plus tard, en 1916 et en 1917, la question des unités revint de nouveau sur le tapis. Les arguments présentés à ce moment n'ont sans doute pas perdu leur valeur, car nous retrouvons un assez grand nombre d'entre eux, soit dans les communications des orateurs qui viennent de prendre la parole devant vous, soit dans celles des savants qui ont pris part à la discussion récente instituée sur le même sujet à la Société française de Physique.

» Dans toutes les branches de la physique, on rencontre des problèmes de cet ordre, mais dans aucune ils n'ont autant d'importance qu'en électricité.

» La théorie des équations de dimensions remonte à Fourier, qui en posa les principes dans son mémoire classique sur la propagation de la chaleur et montra que tout le sujet est dominé par la considération de l'homogénéité. Plus tard, Joseph Bertrand, dans un de ses premiers travaux qui fut très remarqué, fit voir comment les simples exigences de l'homogénéité peuvent, indépendamment de toute analyse physique du mécanisme des phénomènes, conduire aux équations du pendule ou des cordes vibrantes. Mais ce fut surtout à propos de l'établissement d'un système absolu d'unités électriques, et lors des débats qui aboutirent à l'adoption internationale des systèmes électromagnétique et électrostatique C. G. S., dans le dernier quart du XIX^e siècle, qu'eurent lieu les discussions les plus prolongées.

» La lecture des mémoires consacrés à ces problèmes laisse l'impression que bien qu'on s'appuie sur des considérations d'ordre mathématique, on se meut cependant dans un ordre d'idées où il est malaisé d'arriver à une rigueur qui satisfasse pleinement les esprits géométriques. Les solutions adoptées compor-

tent une certaine part d'arbitraire, et en se ralliant à l'une plutôt qu'à l'autre, on se laisse souvent guider par des considérations de simplicité ou de généralité, qui se recommandent mais ne s'imposent pas.

» Aussi n'y a-t-il pas lieu d'être surpris de voir des théoriciens aussi avertis que ceux qui sont intervenus tout à l'heure, soutenir des conclusions divergentes.

» Les désaccords peuvent provenir, notamment, du choix des relations fondamentales adoptées comme points de départ. C'est ainsi qu'en 1882, Clausius critiqua la marche suivie par Maxwell qui faisait intervenir la loi électromagnétique de Laplace. Il s'ensuivit dans le *Philosophical Magazine* une controverse où intervinrent Larmor, Lodge, Helmholtz, Everett et J.-J. Thomson.

» Mais aucun des théoriciens de l'époque, pas plus les précédents que lord Kelvin, Joseph Bertrand ou Mascart, n'élevèrent d'objection contre l'emploi de la loi électrostatique de Coulomb. La manière la plus courante aujourd'hui d'écrire cette loi est :

$$f = \frac{1}{\epsilon} \frac{ee'}{r^2},$$

e et e' étant les charges électriques, ϵ un coefficient caractéristique du milieu (constante diélectrique ou perméabilité diélectrique).

» M. Langevin préfère partir d'autres relations, et ne retrouve plus la loi de Coulomb que comme une conséquence indirecte dans laquelle figurent 3 coefficients :

$$f = \frac{\alpha\beta}{\epsilon} \frac{ee'}{r^2}.$$

» Quoiqu'il en soit, aussi bien dans les discussions qui ont eu lieu dans cette enceinte que dans celles qui ont eu lieu au dehors, on est, à peu d'exceptions près, tombé d'accord sur le point que les lois physiques connues ne permettent pas d'exprimer les grandeurs électriques ou magnétiques en fonction des seules grandeurs mécaniques fondamentales, la longueur, la masse et le temps. Il manque une équation, et cette lacune ne paraît pas tenir à notre ignorance, mais à la nature même des choses. D'où la nécessité pour représenter les phénomènes électromagnétiques, de faire appel à une 4^e grandeur fondamentale. M. Brylinski a montré qu'il était intéressant de choisir comme telle la quantité d'élec-

tricité ϵ , et a écrit les équations de dimensions dans le système L, M, T, ϵ .

» On peut d'ailleurs adopter aussi bien les systèmes L, M, T, ϵ ou L, M, T, μ . Pour ma part, je crois qu'il y a avantage à laisser en évidence les deux grandeurs ϵ et μ , en gardant présente à l'esprit l'équation de dimension qui les relie :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

» On constate alors que les exigences de l'homogénéité amènent à écrire sous la forme suivante les quatre formules fondamentales d'actions pondéromotrices : (attraction électrique ou magnétique de Coulomb, attraction électrodynamique d'Ampère, loi de Laplace relative à l'action d'un pôle sur un élément de courant) :

$$f = \frac{1}{\epsilon} \frac{ee'}{r^2}, f = \frac{1}{\mu} \frac{mm'}{r^2}, f = \frac{\mu}{2} \frac{I dl I' dl'}{r^2}, f = \frac{m}{r^2} \frac{I dl}{r^2}.$$

» La dernière formule ne comporte aucun coefficient relatif à l'action du milieu.

» J'ai fait remarquer dans mon mémoire de 1916 que la réciprocité des actions électriques et magnétiques implique l'existence de deux autres actions pondéromotrices. On admet qu'il existe trois sortes de courants électriques : courant de conduction de Volta, courant de déplacement de Maxwell, courant de convection de Rowland. En magnétisme, on n'a pas observé de courants de conduction, mais on connaît les courants de déplacement (dans l'aimantation d'un transformateur par exemple), et les courants de convection (rotation des pôles d'aimants dans les expériences d'Ampère et de Faraday, par exemple). Dès lors, si l'on désigne par $I = \frac{dm}{dt}$ le courant magnétique, on est amené à poser les deux lois pondéromotrices supplémentaires :

$$f = \epsilon \frac{2 I dl I' dl'}{r^2}, f = \frac{e I dl}{r^2}.$$

» La dernière formule est indépendante du milieu.

» Il est intéressant de laisser en évidence les facteurs ϵ et μ qui montrent comment varient les attractions quand on change le milieu. Rappelons seulement, pour montrer leur utilité, que jadis, Vaschy, cherchant quelle pouvait être l'influence du milieu sur les attractions électrodynamiques, opéra sur des liquides doués

de constantes diélectriques variées, alors que les formules précédentes montrent que c'est la perméabilité magnétique qu'il eut fallu faire varier.

» J'ai admis dans ces calculs, comme on le fait d'habitude, que la liaison entre l'électricité statique et l'électricité dynamique s'établit au moyen de l'équation :

$$I = \frac{de}{dt},$$

qui ne comporte pas de coefficient. M. Abraham pense qu'il vaudrait mieux écrire :

$$I = \frac{1}{\lambda} \frac{de}{dt}.$$

Une suggestion de ce genre avait déjà été faite en 1890 par J. Bertrand, dans ses « Leçons sur la théorie mathématique de l'électricité ». Il critiquait l'équation usuelle, comme établissant un parallélisme douteux entre un courant et « un fleuve d'électricité », et il suggérait de prendre pour définition du courant la masse d'électricité libre dans l'unité de longueur :

$$I = \frac{de}{dl},$$

ce qui mène, dit-il, à des formules très élégantes. Avec cette convention, le coefficient λ a les dimensions d'une vitesse v , et on sait que cette vitesse a été trouvée égale à celle de la lumière.

» Mais Bertrand lui-même a reconnu qu'en déchargeant un condensateur dans un galvanomètre balistique, les physiciens avaient réussi à mesurer expérimentalement le rapport de la masse électrique au temps, tandis qu'aucun artifice analogue n'a permis de mesurer le rapport de la masse à la longueur du fil. Une telle constatation est de nature à faire penser que la formule habituelle du courant représente mieux les faits que celle de Bertrand.

» Au cours de notre discussion de 1917, j'ai eu l'occasion d'appeler l'attention sur un autre point sur lequel M. Pomey est revenu récemment. Il a rappelé qu'il existe des grandeurs physiques de dimensions nulles, et il a cité comme exemple le coefficient de frottement : c'est le rapport de deux forces perpendiculaires l'une à l'autre, mais peu importe, dit-il, pour les formules de dimensions. Ceci est exact, en effet, dans le système L, M, T ; mais cela ne l'est plus si, tenant compte des directions de l'es-

pace, on adopte un système X, Y, Z, M, T. Ce nouveau symbolisme permet de pénétrer plus profondément dans la nature des grandeurs. Dans le premier système, une surface est exprimée par L^2 ; dans le second, par XY, YZ ou ZX. Dans le premier système, un angle est une grandeur de dimensions nulles ; dans le second système, il est représenté par XY^{-1} , XZ^{-1} ou ZX^{-1} . Dans le premier système, un travail et un couple ont les mêmes dimensions $M L^2 T^{-2}$; dans le second système, un travail s'exprime par $M X^2 T^{-2}$, $M Y^2 T^{-2}$ ou $M Z^2 T^{-2}$ et un couple par $M X Y T^{-2}$, $M Y Z T^{-2}$ ou $M Z Y T^{-2}$.

» Ce symbolisme m'a permis en particulier de montrer que dans un système d'analogies mécaniques que j'avais développées en assimilant la perméabilité diélectrique ϵ à une densité et la perméabilité magnétique μ à une rigidité, l'induction magnétique — qui se présenterait comme une grandeur de dimensions nulles dans le système L, M, T, — avait les dimensions d'un angle $Y Z^{-1}$, et le champ celles d'un couple par unité de volume

$$\frac{M Y Z T^{-2}}{X Y Z}$$

» On voit que dans cet ensemble d'équations, l'induction et le champ apparaissent comme des grandeurs de dimensions différentes, ce qui résultait du fait que la perméabilité n'était pas regardée comme un simple nombre. Je me ralliais donc au point de vue soutenu par M. Brylinski qui, dans les conclusions de son mémoire de 1909, indiquait que le champ et l'induction magnétiques étant très probablement des grandeurs différentes et n'ayant pas les mêmes dimensions, il y avait lieu de donner un nom nouveau à l'une de ces deux unités. Il ajoutait d'ailleurs que la Commission électrotechnique internationale était compétente pour élucider ces questions. Ce double vœu répondait parfaitement à certaines préoccupations plus récemment formulées par M. Abraham.

» Dans cette même controverse, le 3 mars 1909, Pellat rappela qu'il régnait une certaine confusion, du fait que l'on définissait l'induction de deux manières différentes. D'après la définition primitive de Maxwell, le vecteur induction est la somme des deux vecteurs, le vecteur champ, et le vecteur aimantation multipliée par 4π

$$B = \mu + 4\pi I.$$

» Mais une autre définition a été proposée depuis : pour

représenter dans tous les systèmes d'unités la propagation d'une onde électromagnétique par l'équation :

$$\varphi^2 = \frac{1}{\epsilon \mu},$$

on a pris pour induction magnétique le vecteur dont l'intensité B permet dans tous ces systèmes de représenter l'énergie du champ magnétique contenue dans un volume $d\nu$ par :

$$d\omega = \frac{1}{8\pi} B H d\nu.$$

Pellat concluait : « Ces deux définitions sont donc bien différentes. Laquelle préférer ? Sans hésitation, je préfère celle donnée par Maxwell. »

» M. Brylinski, au contraire, fit connaître que, dix ans environ plus tôt, Potier avait exprimé catégoriquement l'avis qu'il convenait de renoncer à la définition de Maxwell.

» La position du problème n'a donc guère changé depuis une vingtaine d'années. Il s'est cependant fait un incontestable mouvement dans l'esprit des techniciens. L'opinion de Potier a gagné de plus en plus de terrain parmi les ingénieurs chargés du calcul des machines où interviennent le champ et l'induction, et il me paraît, comme à M. Brylinski, que l'heure est venue de la faire consacrer par la Commission électrotechnique internationale. »

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES

L'énergie électrique dans les usines à gaz,

Par H.-C. Widlake (Inst. Elect. Eng., avril 1920)

L'auteur décrit en détail toute une variété de destinations pour lesquelles l'énergie électrique est actuellement utilisée dans les usines à gaz. Des dessins de quelques-unes des machines sont reproduits. L'utilisation des moteurs électriques a lieu, notamment, pour les machines de chargement, les transporteurs, les compresseurs, les laveurs, les lignes de téléphérage, les hydro-extracteurs, les monte-charges, les pompes, etc.

Calculs des forces magnétomotrices des alternateurs à champ cylindrique dans les conditions de court-circuit,

Par A.-E. Clayton (Inst. Elect. Eng., avril 1920)

Ce mémoire fait suite au travail publié par l'auteur sur le fonctionnement des alternateurs dans les conditions de court-circuit permanent, et c'est le résultat d'une étude de la réactance de dispersion des alternateurs à champ cylindrique. Il est procédé à un examen de la précision des diverses méthodes en usage pour le calcul des valeurs des forces magnétomotrices en jeu dans les alternateurs cylindriques en état de court-circuit permanent. Il est montré que ces calculs de forces magnétomotrices peuvent s'effectuer très simplement en fonction des ampères-tours maxima réels par pôle du bobinage inducteur, et qu'ils sont, non seulement plus simples, mais plus exacts que les calculs similaires effectués pour les machines à pôles saillants. Tout d'abord, l'auteur entre dans des considérations générales sur le fonctionnement des alternateurs à champ cylindrique en condition de court-circuit permanent; puis la forme d'onde, la grandeur, l'analyse harmonique de la force magnétomotrice principale et de la force magnétomotrice de l'induit, sont discutées; enfin l'application pratique des résultats obtenus est démontrée. Les bobinages à pas partiel, les machines polyphasées non équilibrées et les bobinages irrégulièrement distribués sont également pris en considération. Les méthodes de l'auteur sont comparées avec d'autres, et l'analyse harmonique des formes d'ondes rectilignes est examinée.

Le cas particulier d'un alternateur à champ cylindrique, travaillant dans les conditions de court-circuit permanent, est traité en détail; à ce sujet, il convient de se reporter au mémoire original.

Systèmes d'excitatrices,

Par J.-W. Parker, A.-A. Meyer, H.-R. Summerhayes, C.-A. Boddie, F.-L. Moon, J.-D. Ross, H.-H. Cox et H. Michener (Amer. Inst. Elect. Eng., juin 1920)

Six des mémoires traitent de la question des systèmes d'excitatrices; quatre de ces mémoires traitent du choix des méthodes convenables, tandis que les deux autres traitent de la pratique aujourd'hui en vigueur, d'une part dans les Etats du Nord-Ouest, d'autre part dans la Californie du Sud.

Développement des valves thermoioniques dans les applications à la Marine,

Par B.-S. Gossling (Inst. Elect. Eng., août 1920)

Les quatre premières parties de ce mémoire décrivent l'introduction des valves dans les installations navales de télégraphie sans fil, ainsi que les premières recherches expérimentales et théoriques propres à élucider leur conduite. La 5^e partie traite des principes du calcul numérique des valves d'énergie, plus particulièrement des valves triodes, ainsi que du développement rapide de la fabrication des valves ainsi calculées. Les trois parties suivantes décrivent l'étude et le perfectionnement des petites valves en usage pour la réception, y compris celles à vide élevé et celles à atmosphère gazeuse. Les étapes d'approximation successive dans le calcul des caractéristiques des petites valves à faibles tensions de service, sont décrites dans la 9^e partie, le résultat final des calculs indiquant le degré de raréfaction de l'air pour lequel la conduite d'une valve à vide élevé peut être expliquée en fonction des phénomènes physiques connus. Le chapitre final traite de la normalisation des valves et de leur spécification pour la production en grand.

Comparateur dynamométrique pour la mesure précise des courants alternatifs,

Par E. Velander (Amer. Inst. Elect. Eng., juillet 1920)

Il est ici question d'un appareil perfectionné appartenant au type de dynamomètre différentiel construit par C.-O. Gibbon et décrit par lui-même sous sa première forme, en 1918. Cet appareil comporte un arrangement de connexions, analogue à un pont équilibré, d'après lequel le courant alternatif et un courant continu égalisateur sont amenés aux mêmes bobinages d'un dynamomètre, de telle façon que l'action de la bobine fixe sur la bobine mobile, exercée par le courant alternatif, s'oppose à celle exercée par le courant continu. Un instrument « muet » (« dummy » instrument) est employé pour assurer l'équilibre de la résistance et de l'inductance, dans tous les cas. Divers arrangements de connexions possibles sont discutés, ainsi que la possibilité de certains perfectionnements tels, par exemple, que de combiner les bobines « muettes » et actives en un instrument double qui pourrait ainsi être rendu astatique. L'auteur considère certains réglages essentiels; il examine les erreurs dues à des réglages incorrects et montre qu'elles peuvent se réduire à des valeurs insignifiantes, pourvu que l'équilibre du courant continu soit vérifié par intervalles. D'autre part, l'auteur a simplifié beaucoup la manipulation en recourant à une boîte de contrôle dans laquelle toutes les parties accessoires sont réunies. Grâce à l'instrument décrit, une variation d'intensité de 1 pour 100 produit une déviation de 65 mm, à 1 m, lorsqu'on mesure un courant de 20 milliampères. Avec les modifications suggérées par l'auteur, un courant alternatif de plusieurs microampères peut être mesuré avec précision. L'instrument en question convient à des fréquences allant jusqu'à 2 000 périodes par seconde. Des notes relatives à diverses applications pratiques et une bibliographie succincte terminent le mémoire. Quant aux détails de construction ou aux dimensions du dynamomètre lui-même, ils sont à peu près passés sous silence.

Eclairage par conduction gazeuse, sur circuits à basse tension,

Par D.-M. Moore (Amer. Inst. Elect. Eng., août 1920)

Faisant remonter à Hawksbee (1750) l'origine de l'emploi des gaz lumineux comme sources de lumière, l'auteur passe rapidement en revue les travaux de Geissler (1850), de Crookes (1879), de Nicolas Tesla (1891), et ses propres recherches initiales (1893), qui le mirent sur la voie des tubes Moore. On sait que ces derniers, renfermant d'abord de l'azote ou de l'acide carbonique, fonctionnaient à une tension de plusieurs milliers de volts. L'introduction du néon sur une échelle commerciale permit l'emploi de tubes beaucoup plus petits. Des lampes à colonne gazeuse de 3 m fonctionnent sous 220 volts, à raison de 0,5 watt par bougie sphérique, sans aucun transformateur, mais elles nécessitent un dispositif d'amorçage. Or, l'auteur expérimente actuellement un nouveau type de lampe à néon, pouvant se monter sur un support de lampe à incandescence ordinaire, et qui fonctionne sur un circuit à 220 volts sans exiger aucun dispositif d'amorçage. Ces lampes, dont l'aspect extérieur rappelle celui des lampes à incandescence, comportent des électrodes en aluminium (dont le mémoire décrit plusieurs modèles). Contrairement aux tubes à colonne lumineuse positive, elles n'utilisent que la décharge négative. Elles émettent une lumière d'un beau jaune, mais de faible intensité : 1 bougie environ, leur consommation étant de 15 watts par bougie. Si, de ce fait, les lampes de ce type ne se prêtent actuellement qu'à des applications très restreintes, elles n'en marquent pas moins — vu l'originalité de leur principe — une époque dans l'histoire de l'éclairage par conduction gazeuse.

BIBLIOGRAPHIE

Les ressources du travail intellectuel en France, par Edwe Tassy et Pierre LÉRIS, préface de M. le général SÉBERT, 1 vol. 25 cm × 14 cm, de xxii-712 pages, prix 50 francs net. Paris, Gauthier-Villars et Cie.

Cet ouvrage, dont le titre expose le programme, groupé en un seul volume un grand nombre d'annuaires, guides, bulletins et publications spéciales. Il rassemble, à l'intention de tous les travailleurs intellectuels, un ensemble d'informations précises et détaillées, depuis les indications bibliographiques aptes à les orienter et les renseignements nécessaires sur les académies et sociétés savantes de Paris et de province qui encouragent de leurs prix les œuvres méritantes, jusqu'aux détails sur les moyens matériels de réalisation, de protection et de placement des œuvres.

C'est à ce titre que cet ouvrage peut prétendre être d'un secours précieux aux savants, aux lettrés, aux inventeurs, bref à tous ceux qui, à un degré quelconque, s'adonnent aux sciences et aux arts ou pratiquent l'industrie.

Ce livre sera particulièrement utile aux bibliothécaires, aux archivistes et aux secrétaires de sociétés savantes en leur permettant de répondre promptement aux multiples demandes de renseignements sans avoir à entreprendre de longues et fastidieuses recherches.

Les auteurs ne se sont pas contentés de signaler les Ressources françaises du Travail intellectuel, ils ont mentionné également toutes celles d'un caractère international qui existent à l'étranger.

Analogies mécaniques de l'Electricité, par J.-B. POMEY, 1 volume in-8°. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

M. Pomey, Ingénieur en chef des Télégraphes, vient de publier le texte développé de trois intéressantes conférences faites par lui à l'Ecole supérieure d'Electricité, aux élèves qui suivent les cours de la section de Radiotélégraphie.

Cet ouvrage comporte un examen de la théorie de Maxwell, un exposé de la théorie des vibrations, une étude de la lampe génératrice d'oscillation.

Le but principal de l'auteur est de montrer l'assistance que les phénomènes mécaniques peuvent apporter à l'électricien en lui fournissant une image concrète des phénomènes dont il s'occupe.

Ce livre sera lu avec fruit non seulement par les élèves des cours de radiotélégraphie, mais encore par les mathématiciens, les physiciens, les ingénieurs et tous ceux qu'intéressent les multiples aspects de l'électricité.

Electricité et Matière, par Sir Joseph J.-THOMSON. Traduction française de M. Maurice SOLOVINE, 1 volume petit in-16. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Le premier volume qui vient de paraître dans « Science et Civilisation » est l'ouvrage célèbre de Sir Joseph J.-Thomson : « Electricité et Matière ».

M. Maurice Solovine en a fait une excellente traduction, que M. Paul Langevin, professeur de physique au Collège de France, a bien voulu présenter au public français dans une préface remarquable.

Ce petit volume, orné d'un fort beau portrait de l'illustre physicien anglais, est d'une impression typographique particulièrement soignée et aura sa place dans la bibliothèque de tout homme cultivé.

Ether ou Relativité, par M. M. GANDILLOT, 1 volume petit in-16. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Depuis plusieurs années, l'insuffisance de la physique classique apparaissait par ses contradictions avec certains faits. En adoptant, après divers tâtonnements, un principe de relativité convenablement remanié, Einstein rétablit (au moins pour le moment) l'accord entre l'expérience et la théorie. Mais on a reproché à cette ingénieuse synthèse d'être un peu arbitraire dans le choix de

certaines des solutions auxquelles elle s'est arrêtée ; elle exige aussi le remplacement du sens commun par le sens transcendantal.

Une autre solution du même problème consiste à conserver sans changements les principes de la physique et ceux du sens commun, mais en redressant la physique elle-même, d'après les enseignements que fournit une attentive étude expérimentale de l'Ether. Cette étude, devenue facile depuis quelques années, nous explique fort simplement les phénomènes. Elle nous montre, par exemple, comment la même cause peut engendrer les lois de l'attraction (Newton) et celles de l'agitation brownienne des colloïdes (M. Perrin) ; comment on peut exprimer les températures en kilogramme par atome-gramme, et définir le courant d'un câble électrique par sa vitesse et par son débit en grammes d'éther à l'heure ; pourquoi la Lune est indocile aux lois newtoniennes et pourquoi la périphérie de Mercure tourne dans le même sens que cette planète, etc.

En définitive, la physique éthérienne explique les mêmes phénomènes que la relativité généralisée, mais elle le fait par des procédés radicalement différents, sans modifier en quoi que ce soit ni les principes, ni la conception du temps, ni les règles traditionnelles du sens commun.

Manuel pratique de l'ouvrier Electricien-Mécanicien. Principes, fonctionnement, conduite et entretien des machines électriques. Nouvelle traduction et adaptation française de l'ouvrage de Ernst SHULTZ, par L. STERNBERG, Ingénieur de l'Ecole supérieure d'Electricité, 1 vol. 21 cm X 13 cm. Paris, Dunod, 1922.

Cet ouvrage est un exposé simple, mais cependant rigoureux, de la théorie des machines électriques. L'auteur s'est attaché à exclure de ses démonstrations toutes les formules compliquées pour rendre ce livre d'une lecture facile et s'adressant aussi bien à l'ingénieur par la précision de l'exposé, qu'à l'ouvrier par sa clarté.

A côté des chapitres sur la théorie proprement dite, se trouvent quelques chapitres envisageant le côté pratique de la question : dérangements des machines, interprétation des résultats d'essais, rendement, ainsi que quelques conseils sur les caractéristiques à choisir dans une série de machines en vue d'une application déterminée.

Il faut souhaiter à ce livre un bon accueil chez tous ceux qui, s'intéressant aux phénomènes de l'Electrotechnique, cherchent à en avoir une explication simple, mais exacte.

Notions élémentaires de Télégraphie sans fil, par Jean RÉMAUR, 1 vol. in-8°. Paris, Desferges, 1921.

Ce petit volume, sans prétention scientifique, arrive bien à son heure au moment de la grande vogue dont jouit la télégraphie sans fil auprès des amateurs. Ceux-ci y trouveront clairement exposés les principes élémentaires de la télégraphie sans fil, ainsi qu'un certain nombre de renseignements sur la réalisation pratique d'appareils de réception d'amateur.

La fraude, la sinistrose et les médecins marrons dans les accidents du travail, par Ed. de Giscard. 1 vol. in-8°. Paris, l'Usine, 1922.

L'ouvrage de M. de Giscard est une étude pratique qui s'adresse non seulement à tous les industriels, mais aussi à tous ceux qui s'occupent des accidents du travail, soit comme assurés, soit comme assureurs, soit même comme médecins.

L'auteur, ancien chef du service médical de grandes usines de la région parisienne a exposé ce qu'il a vu, ce qu'il a fait et les moyens de combattre les abus devenus par trop criants.

Ainsi que le déclare dans sa préface le Professeur Balthazar, professeur de médecine légale et membre de l'Académie de Médecine de Paris : « Les abus qu'il signale sont bien connus de tous ceux qui ont été appelés à examiner des ouvriers victimes d'accidents ou se prétendant victimes d'accidents de travail. »

Cet ouvrage, non seulement démasque les fraudeurs et les exploités de la loi sur les accidents du travail (sinistrés et médecins marrons), mais il indi-

que les moyens de se défendre contre eux et par là même de faire baisser le coût de l'assurance-accidents.

Cette étude contient une description très complète de tous les accidents et maladies qui peuvent se présenter dans une exploitation, ainsi que la manière de reconnaître la supercherie et la fraude.

De nombreux tableaux et graphiques, des statistiques fort bien établies concernant les frais, charges, contrôle, etc., une jurisprudence très riche, font de cet ouvrage un livre du plus grand intérêt pour tout ce qui concerne les accidents de travail.

Manuel de l'Electricien, par P. MAURER, 1 vol. in-18. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1922.

Voici un ouvrage pratique, à la portée de tous, où sont condensés tous les éléments nécessaires à l'établissement d'une installation d'éclairage électrique.

Il s'adressera aussi bien aux particuliers, qu'à l'ouvrier et au technicien.

En voici la table des matières.

Distribution de l'Energie électrique — Généralités — Exécution des installations, sonneries et tableaux indicateurs.

Album de plans de pose pour l'installation de la Force par l'Electricité, par H. DE GRAFFIGNY. 1 vol. in-8°. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Le présent album est le quatrième et dernier d'une série de plans et projets d'installations concernant les applications de l'énergie électrique aux besoins de l'industrie.

Les trois premiers étaient consacrés aux Sonnettes, aux Téléphones et à l'Eclairage ; celui-ci est réservé à la Force, et il complète la collection qui comporte ainsi, en quatre volumes, près de 140 plans.

Restant fidèle à la méthode qu'il a adoptée, l'auteur procède encore en passant du plus simple au plus compliqué, selon les différents cas de la pratique.

Les usages du courant continu sont d'abord passés en revue, puis les courants alternatifs à basse et à haute tension, avec et sans transformation, enfin les applications à la traction.

Cet album pourra ainsi constituer un guide de quelque utilité pour ceux qui ont à organiser des stations ou des réseaux de distribution d'énergie motrice pour usages particuliers ou publics, en leur montrant comment les appareils de commande ou récepteurs doivent être agencés dans les circuits.

Hydraulique industrielle et usines hydrauliques, par M. EYDOUX, professeur à l'Ecole des Ponts et Chaussées. 1 vol. grand in-8°. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1921.

Ce volume, suite naturelle du premier ouvrage du même auteur, « Hydraulique générale et appliquée », est le développement du cours d'Hydraulique industrielle de l'Ecole des Ponts et Chaussées.

Il débute par un exposé des machines hydrauliques et par des indications sur les turbines modernes qui permettent à tout ingénieur qui a à installer une usine, de choisir en connaissance de cause les types qu'il doit utiliser.

Vient ensuite une étude des pompes et des distributions d'eau sous pression, comprenant également un exposé des questions nouvelles qui sont la transmission hydraulique et les moteurs soniques. Ces points sont développés surtout au point de vue des idées générales, sans entrer dans les détails de construction, qui sont mieux à leur place dans un cours de technologie.

La partie la plus importante est consacrée aux usines hydrauliques dont l'auteur s'est particulièrement occupé, puisque les usines de la construction desquelles il a eu et a encore à s'occuper dépassent 200 000 chevaux. Cette partie est présentée de façon nouvelle.

Dégage de toute théorie hydraulique, puisque celle-ci est traitée dans le premier volume, elle ne présente pas le caractère encyclopédique qu'ont en général les ouvrages qui traitent du même sujet. M. Eydoux s'est surtout efforcé de donner les directions générales si nécessaires aux ingénieurs qui ont à s'occuper de ces questions et s'est borné à appuyer ces données sur quel-

ques exemples bien choisis ; car, dans des questions qui se ramènent presque toujours à des cas d'espèce, il est impossible de chercher à résoudre par avance tous les cas. Le chapitre relatif aux conduites forcées a cependant été particulièrement développé, car c'est un organe qu'on ne retrouve que dans les usines, alors que les barrages, par exemple, se retrouvent en navigation intérieure et ont été décrits à cette occasion.

Enfin, l'ouvrage se termine par quelques mots sur les usines à marées.

Ce livre, de la plus haute actualité, comble une lacune dans la littérature technique française ; aussi peut-on dire que les deux livres de M. Eydoux constituent un ensemble indispensable à tous ceux qui s'occupent de l'hydraulique et de ses applications industrielles.

Introduction à la théorie des courants téléphoniques et de la radiotélégraphie, par J.-B. POMEY, Ingénieur en chef des Télégraphes. Préface de M. A. BLONDEL, membre de l'Institut. 1 vol. 250 cm × 162 cm de 510 pages, avec 100 figures dans le texte. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1920.

Le présent ouvrage, qui fait suite au remarquable « Cours d'électricité théorique », publié par l'auteur en 1914, constitue comme ce dernier, et dans la pleine force du terme, un cours supérieur. Aussi ne saurait-il s'adresser à tous. C'est, du reste, ce que M. Pomey lui-même a pris soin d'indiquer en ces termes :

« Un certain nombre de chapitres du présent ouvrage ont fait l'objet de leçons professées à l'Ecole professionnelle supérieure des Postes et Télégraphes aux élèves ingénieurs. Ceux-ci sont d'anciens élèves de l'Ecole Polytechnique ou des licenciés, etc. On voit par là le degré d'instruction qui est supposé chez le lecteur. Cependant, les chapitres sur le calcul vectoriel, sur les imaginaires, etc., ne supposent d'autres connaissances que celles des mathématiques élémentaires et, d'une façon générale, l'auteur s'est efforcé de développer les calculs, de manière à éviter l'obligation de recourir à d'autres traités. »

Si les solutions des sujets étudiés ici sont déjà plus ou moins connues, leur méthode d'exposition, parfaite de précision et de logique, est essentiellement personnelle à l'auteur. On n'en jugera que faiblement d'après cet aperçu du plan de l'ouvrage.

Dans le chapitre I (Introduction mathématique) sont rappelés sommairement les principes du calcul vectoriel. Le chapitre II est consacré aux phénomènes fondamentaux du magnétisme et de l'électricité. Dans le chapitre III l'auteur aborde les propriétés générales du champ électrique (loi d'Ohm, loi de Laplace, loi de l'induction), tandis qu'il expose, dans le chapitre suivant, la théorie de Maxwell, la conception de Faraday, etc., pour aboutir aux équations de Lorentz. Les chapitres V et VI traitent, respectivement, des fonctions harmoniques simples, courants périodiques et des oscillations amorties. Sont étudiées, dans le chapitre VII, les méthodes de répétition, la synchronisation et, dans le chapitre VIII, la décharge oscillante du condensateur. Dans le chapitre IX (Electromagnétique et Mécanique), l'auteur, complétant les idées de Maxwell, et donnant aux lois de Kirchhoff une interprétation mécanique, aboutit à des résultats particulièrement intéressants. Au chapitre X, on trouve la démonstration de plusieurs théorèmes concernant la puissance réelle et la puissance réactive. Les chapitres XI et XII ont trait aux recherches de Pupin et à la pupinisation en téléphonie. Dans le chapitre XIII (Calcul symbolique: Coefficients de réflexion. Propagation du courant sur un câble. Développement d'Heaviside), il est donné un aperçu des méthodes, assez peu connues, d'Heaviside. Au chapitre XIV (Propagation du courant), l'auteur montre qu'on peut résoudre le problème de la propagation le long d'une ligne télégraphique, en tenant compte des appareils d'émission et de réception, sans avoir à intégrer l'équation des télégraphistes. Le chapitre XV traite de l'antenne (partie mécanique) et le suivant traite des vibrations électriques de l'antenne. Le chapitre XVII a pour objets la résonance primaire et l'alternateur à résonance. Enfin, dans les six derniers chapitres, XVIII à XXIII, sont étudiés respectivement : le régime périodique d'émission dans les postes à étincelles ; la génération des oscillations entretenues ; les circuits oscillants, l'accouplement ; l'amortissement, la formule de Bjerknès ; la capacité

et l'induction ; la propagation des ondulations électriques produites par un dipôle.

Une liste détaillée des formules démontrées au cours de ces chapitres est annexée à la table des matières, et un index bibliographique figure en tête du volume.

Dans sa lumineuse préface, M. A. Blondel met judicieusement en relief les mérites de l'auteur, et c'est ainsi qu'il conclut :

« En définitive, M. Pomey, en écrivant le présent ouvrage, a non seulement enrichi notre littérature scientifique française, mais encore rendu un très grand service, à la fois aux théoriciens qui veulent se mettre au courant des applications modernes de l'Électricité, et aux techniciens qui veulent s'initier le plus rapidement et le plus directement possible aux méthodes nouvelles de calcul et acquérir des notions rigoureuses et précises, en même temps que des aperçus philosophiques, sur les phénomènes fondamentaux dont ils ont à faire l'application. »

IL Y A TRENTÉ ANS

Les effets physiologiques de l'état variable en général et des courants alternatifs en particulier (M. le D^r A. d'Arsonval).

Expériences avec les courants alternatifs de grande fréquence et de haute tension (M. N. Tesla).

Le Gérant : J. GUYOT.

Imp. Henrui, 20, rue Germain, PARIS.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 3 mai 1922 :
Admission de membres titulaires, p. 225. — Allocution de M. le Président, p. 227.
— Surtensions dans les transformateurs (M. BUNET), p. 229. — Les pieds pour poteaux en bois (M. de TRAZ), p. 261. — Remarques sur la communication de M. de Traz (M. LECLER), p. 284.
IL Y A TRENTE ANS, p. 239.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 3 mai 1922. (1)

Présidence de M. M. BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente réunion est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

Fayolle (Marie-Martin-Pierre), Ingénieur principal de l'Artillerie navale, 5, rue rue Victorien-Sardou, à Paris (16^e). — Présenté par MM. P. Janet et G.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Fournier (Raymond-Joseph), Elève à l'E. S. E., 21, rue Bourg-Tibourg, à Paris (4^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

El Khalidy (André-Jean), Ingénieur des Arts et Métiers, Elève à l'E. S. E., 24, boulevard Pasteur, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Malley (Jean-Eugène-Séraphin), Ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Elève ingénieur des Postes, Télégraphes et Téléphones, Elève à l'E. S. E., 15 bis, boulevard Victor, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Pavageau (Louis-Edouard-Léopold), Ingénieur des Arts et Métiers, Elève à l'E. S. E., 3, boulevard de Grenelle, à Paris (15^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Vaulot (Emile-Théophile-Amédée), Ingénieur des Postes, Télégraphes et Téléphones, Agrégé des Sciences mathématiques, Répétiteur à l'Ecole Polytechnique, Ancien élève de l'Ecole Polytechnique et de l'E. S. E., 42, rue Barbet-de-Jouy, à Paris (7^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

ALLOCUTION DE M. LE PRÉSIDENT

» MESSIEURS ET CHERS CONFRÈRES,

» Au moment de prendre la présidence effective de vos séances mensuelles, je ressens, plus vivement encore que le mois dernier, l'insuffisance de ma préparation à ces délicates fonctions. Après tant et de si éminents présidents d'une compétence éprouvée pour tout ce qui concerne l'industrie électrique, vous avez voulu, je pense, vous offrir le luxe d'un président-élève, et m'obliger à rattraper quinze ou vingt ans d'insuffisante activité par une année de présence obligatoire. Désireux de tirer bon parti de ces dix leçons d'Électricité industrielle auxquelles vous m'avez si amicalement convié, je demanderai à notre actif Secrétaire général de choisir l'ordre du jour des séances de manière à me faire connaître l'état et les progrès les plus récents de l'Industrie électrique sous toutes ses faces. C'est d'Industrie que je suis curieux : — technique, — administration et relations avec le personnel et les Pouvoirs publics, — relations commerciales internationales, — utilisation pour la mise en valeur de nos immenses territoires de l'Afrique du Nord et de l'Afrique équatoriale. — La science physique a fait, depuis vingt-cinq ans, de si rapides progrès et subi de si étourdissantes transformations, qu'il avait bien fallu faire un choix, et pour apporter quelques petites pierres ou un peu de ciment à la construction de ce prodigieux édifice, négliger à peu près complètement la lecture et l'étude des revues industrielles. Je me réjouis à la pensée d'avoir, cette année, un jour de vacances par mois, jour de sécurité, où vous me parlerez de questions concrètes, bien définies, sans perdre jamais contact avec les réalités, et pourtant audacieuses dans leur conception, féériques dans leurs résultats.

» Ainsi, je compte sur vous pour m'instruire ; comptez sur moi pour vous servir, si je le puis, et surtout pour ne pas vous nuire, ce qui est, je le crains, la seule manière de vous servir qui soit dans mes aptitudes. Heureusement, votre Société possède une forte organisation permanente, sous forme de comités à compétence bien délimitée, dont les présidents ne sont pas soumis au renouvellement annuel, ce qui leur permet de mener à bien des entreprises de longue haleine. L'un des plus importants actuellement, est celui qui s'occupe de la souscription destinée à permettre une

reconstruction et réorganisation du Laboratoire et de l'Ecole supérieure d'Electricité, devenues tout à fait nécessaires. Vous savez que l'initiative du projet actuel est due à votre confrère M. Geoffroy, qui, depuis deux ans, s'est consacré, avec un dévouement infatigable, à faire triompher cette idée que l'industrie électrique de notre pays est à la fois assez riche, assez généreuse et assez consciente de la solidarité qui lie ses intérêts et sa prospérité au développement de notre Ecole supérieure d'Electricité, pour fournir largement les fonds nécessaires. Accueilli d'abord avec un scepticisme non dissimulé, ce projet a fini par prendre une forme dont le succès est certain, grâce aux nombreux, actifs et puissants collaborateurs que M. Geoffroy a réussi à atteler à son œuvre. Parmi ceux-ci, le plus éminent, sans conteste, est votre président sortant, M. Jean Rey. Vous savez avec quelle courtoisie et quelle compétence il a présidé vos séances. Vous serez heureux d'apprendre que son activité, ses connaissances universelles — scientifiques, techniques et administratives — son dévouement, trouveront un emploi permanent dans la fonction la plus importante peut-être pour la prospérité de votre Société, la présidence de la Commission administrative du Laboratoire central et de l'Ecole supérieure d'Electricité.

» En raison de ses nombreuses occupations, M. D. Berthelot, après plusieurs années de présidence active de cette Commission, a désiré être relevé de ses fonctions. Tout en regrettant cette décision et remerciant vivement M. Berthelot de ses éminents services, la Commission a dû accéder à son désir. Comme nouveau président, la Commission a élu à l'unanimité M. Jean Réy. S'il quitte le fauteuil confortable de cette salle, c'est donc pour en occuper plus longtemps un autre, et continuer — invisible et présent — à se dévouer de tout cœur à votre Société. Je lui en témoigne, en votre nom, notre sincère reconnaissance. »

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

SURTENSIONS DANS LES TRANSFORMATEURS

La présente étude, résumé d'un chapitre de l'ouvrage sur les transformateurs de l'encyclopédie Blondel, actuellement sous presse, a pour but de contribuer principalement à armer les constructeurs et les exploitants en leur résumant et développant des conceptions indispensables à la claire compréhension du fonctionnement des transformateurs de grande puissance et haute tension.

M. P. BUNET. — « 1° On constate parfois sur des transformateurs en service des marques de tensions beaucoup plus élevées que les valeurs normales, soit à la masse, soit entre bobines ou entre spires. Un certain nombre de publications ont déjà paru sur le sujet, qui résolvent plus ou moins les questions de l'explication de ces surtensions et la prévision de leur apparition. En général, elles restent trop dans le vague en ce qui concerne l'application à la pratique et les renseignements qu'en peut tirer le constructeur. Cependant, la question est importante et d'autant plus que l'on atteint de plus grandes puissances et tensions ; certains parlent de réglementations, d'essais à imposer aux constructeurs. Il paraît donc désirable que notre Société recueille l'avis de ceux de ses membres qui ont étudié la question. Ayant eu à la traiter longuement, dans le volume de l'encyclopédie que dirige M. Blondel, et qui paraîtra bientôt, je vous en résume les points principaux, tels que cela résulte de rares publications vraiment intéressantes et d'idées personnelles.

» 2° *Oscillations libres ou naturelles.* — Comme dans tout circuit, il se produit à chaque fermeture, ouverture, ..., des oscillations de certaines fréquences, qui se superposent temporairement aux valeurs de régime des tensions et courants. Ces fréquences d'oscillations varient avec le mode de connexion du transformateur. Si la tension appliquée contient la fréquence d'une des oscillations libres ou naturelles qui peuvent se produire dans les conditions existantes, il y a résonance.

» Si on caractérise un transformateur avec secondaire ouvert par une self-inductance L ou l par unité de longueur, et une capacité C mesurée ou calculée entre l'enroulement et la masse, qu'on peut rapporter aussi à l'unité de longueur c , que nous ne préciserons pas plus l'une et l'autre pour l'instant, nous savons que dans le cas d'un réseau indéfini avec un pôle à la terre (ou le neutre d'une étoile triphasée) (fig. 1), les deux interrupteurs A et B étant fermés, la période d'oscillation correspond à la demi-

onde, le transformateur oscillant comme une barre encastrée aux deux extrémités (l'une sur la terre, l'autre sur le réseau indéfini) ou un tuyau fermé aux deux bouts; la fréquence d'oscillation est, déterminée comme on le fait en acoustique,

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{CL}}$$

et, en général,
$$f'_0 = \frac{p}{2} \sqrt{\frac{1}{CL}},$$

tous les harmoniques de f_0 pouvant exister ; de sorte que l'oscil-

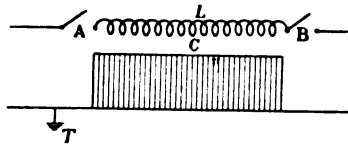


Fig. 1.

lation libre ou naturelle est complexe, les différents harmoniques y entrant en proportions variables selon la nature de la cause déterminant l'oscillation (fig. 2).

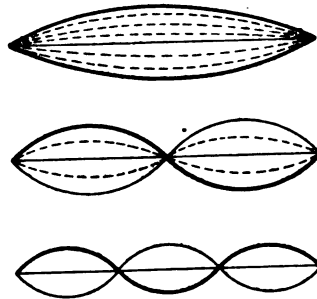


Fig. 2.

» En ce qui concerne la tension, les deux bouts seront des *nœuds* avec tension nulle, puisque, d'un côté, on se trouve réuni à la terre ; de l'autre, mis en court-circuit sur un réseau indéfini. Le courant, au contraire, jouera le rôle des compressions en acoustique, de sorte que tensions et courants prendront l'allure de la figure 3 avec *ventres* à l'extrémité pour ces derniers. Considérons, par exemple, les tensions; toutes les valeurs de u au même instant t seront sur une sinusoïde en $\sin p \frac{\pi x}{A}$, A étant la longueur totale,

l'amplitude de cette sinusoïde variant elle-même sinusoïdalement avec le temps jusqu'aux positions extrêmes, et

$$u = U_p \sin(2\pi f_0 t) \sin\left(p \frac{\pi x}{A}\right).$$

» La longueur d'onde λ_0 est le double de la longueur du circuit pour l'oscillation fondamentale, et p fois moins pour l'harmonique p . On sait que si V est la vitesse de propagation

$$\lambda_0 = \frac{V}{f_0} \quad \text{et} \quad V = \frac{1}{\sqrt{cl}} = \frac{A}{\sqrt{CL}}.$$

On peut, comme en acoustique, se représenter l'oscillation globale, ou la supposer comme la somme de deux ondes, l'une directe, l'autre réfléchie de vitesse $+V$ et $-V$.

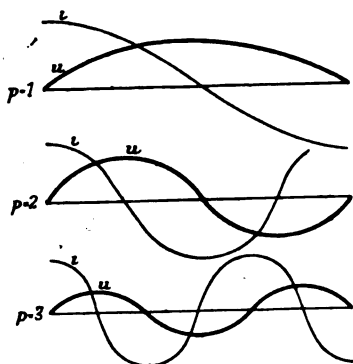


Fig. 3.

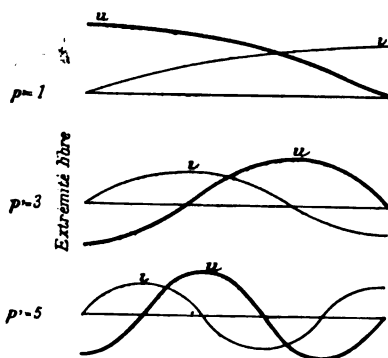


Fig. 4.

» En réalité, l'oscillation est plus compliquée, dans le cas général où la transmission de ces oscillations nécessite aussi un transport de puissance, tout au moins les pertes.

» Au lieu d'avoir une extrémité à la terre, on peut avoir le milieu du transformateur à la terre ; on voit que cela revient à deux transformateurs précédents mis en série, la fréquence f_0 étant déterminée par les constantes d'une des moitiés. Si le transformateur est complètement isolé de la terre, en ce qui concerne l'oscillation naturelle, on peut considérer ses deux bouts comme réunis l'un sur l'autre par le réseau indéfini qui le met en court-circuit ; l'oscillation est alors pleine-onde comme celle d'un anneau fermé sur lui-même au lieu d'une barre et l'on voit que cela revient encore à deux transformateurs en série avec extrémité commune à la terre. Nous pouvons donc considérer le cas

seul d'un tel transformateur, ce qui est plus simple; on passe de là facilement aux autres cas.

» A l'ouverture, supposons qu'on ouvre en A et B à la fois ; en assimilant à l'acoustique, c'est une barre avec les deux bouts libres, ou un tuyau ouvert. L'oscillation est encore demi-onde avec même fréquence ; mais elle est décalée sur celle de la fermeture, et, sur la figure 3, u et i doivent être pris l'un pour l'autre. Mais si l'on n'ouvre qu'en A, on obtient un circuit avec un bout relié à la terre, l'autre libre; c'est une barre avec une extrémité encastree et l'autre libre, c'est aussi un tuyau fermé. La vibration est en quart d'onde

$$f_0 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{1}{CL}}$$

et il n'y a plus que des harmoniques impairs (fig. 4). On trouve cela dans le triphasé Y.

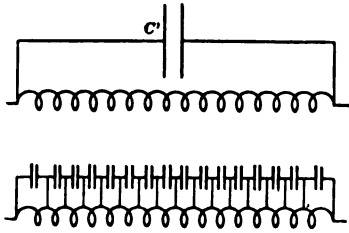


Fig. 5.

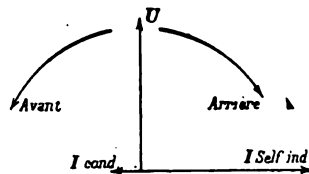


Fig. 6.

» 3° *Capacité entre spires*. — Si on suppose le cas simple d'une seule capacité entre spires successives, elle pourra être assimilée à une capacité unique C' entre extrémités, équivalant à une file de transformateurs chacun en dérivation par exemple sur l'unité de longueur et de valeur $C'A$. Dans le cas où on doit introduire des capacités entre couches, entre bobines ..., il faudra opérer par des séries (voir § 20) et la question devient tout de suite plus compliquée. Admettons ce premier cas simple en vue d'une explication simple (fig. 5).

» Si la bobine était constituée par deux enroulements en parallèle, d'inductance L_1 et L_2 , il y aurait à introduire leur résultante

$$\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} = \mathcal{L}.$$

Considérons les condensateurs $C'A$ comme introduisant des réac-

tances négatives $-\frac{1}{C'A\omega}$.

» Au lieu de

$$\frac{L}{A} \omega,$$

il faudra introduire

$$\frac{\frac{L}{A} \omega \left(-\frac{1}{C' A \omega} \right)}{\frac{L}{A} \omega - \frac{1}{C' A \omega}},$$

soit, au lieu de L ,

$$\frac{L}{1 - L C' \omega^2}.$$

» La fréquence d'oscillation $\frac{1}{N_{\text{ome}}}$ onde

$$f_0 = \frac{1}{N \sqrt{LC}},$$

ou plutôt

$$f_0 = \frac{p}{N \sqrt{LC}}$$

devient ainsi, on le voit facilement,

$$f'_0 = \frac{p}{N \sqrt{L \left(C + \frac{4 \pi^2}{N^2} p^2 C' \right)}}$$

et la vitesse de propagation à la fréquence f , en résonance ou non,

$$V = \frac{A \sqrt{1 - 4 \pi^2 L C' f^2}}{\sqrt{LC}}.$$

» On arrive ainsi à ce résultat, obtenu également par des considérations bien plus compliquées, d'une vitesse de propagation nulle pour $4 \pi^2 L C' f^2 = 1$; pour des fréquences supérieures, V est imaginaire, donc la propagation *telle que nous l'avons envisagée inexistante*.

» Ceci s'explique facilement : la capacité C' en dérivation augmente la self-inductance combinée avec la fréquence. Si (fig. 6) une tension U est appliquée à L et C' en dérivation, les courants sont opposés (I sel-ind) diminue quand la fréquence croît, (I cond) augmente avec la fréquence. Le courant total absorbé est la résultante des deux et diminue quand la fréquence augmente ; si on pose donc $I = \frac{U}{\mathcal{L} \omega}$, la self-inductance résultante $\mathcal{L}$ augmente quand I diminue ; le courant s'inverse après la résonance $4 \pi^2 L C' f^2 = 1$. Au-dessous, la combinaison est une *self-induction* ; au-dessus, c'est une *capacité* ; on n'a donc plus alors en

présence dans le transformateur que deux capacités et plus de self-induction. Les courants doivent alors se propager uniquement comme dans des condensateurs, sans la formation de ces nœuds et ventres qui exigent la présence à la fois de self-inductances et de capacités. La transmission se fait donc dans le milieu selon des lois exponentielles et la tension u en chaque point, au lieu d'un terme $\sin p \frac{\pi x}{A}$, doit contenir des termes en e^{-kx} .

» Ainsi, la capacité entre spires a pour effet de modifier la vitesse propagation avec la fréquence, de telle sorte que dans le cas d'oscillation naturelle, par exemple, les harmoniques ont une longueur d'onde qui décroît en progression arithmétique, tout en étant de fréquences ne suivant pas cette loi simple ; à partir d'un certain ordre, ces harmoniques se rapprochent de plus en plus les uns des autres en tant que fréquence, cette fréquence étant limitée à la fréquence critique f_c .

» 4° Valeurs à attribuer à L . — Il faut, sauf rares exceptions, dans le cas de ces oscillations, prendre pour L une valeur bien inférieure au coefficient de self-induction totale déterminé par $\frac{U}{I_m \omega}$, I_m étant le courant magnétisant pour la pulsation normale ω .

» Les équations des lignes électriques d'où nous tirons les valeurs de f_0 sont établies en écrivant que la tension dans l'élément de circuit dx est la résultante de $r dx$ et de $l \frac{dI}{dt} dx$; il faudrait écrire ce dernier terme sous forme $\frac{d\Phi}{dt} dx$, en introduisant le flux par unité de longueur. Mais, dans le cas d'une longue ligne, ces deux expressions reviennent au même, un élément éloigné étant sans action sur dx .

» Dans un transformateur à vide, chaque élément, une spire par exemple, est traversé par un flux résultant de lignes de force locales qui est de la même forme que le flux élémentaire dans une ligne ; mais, en plus, par un flux, en général beaucoup plus important, provenant des courants dans toutes les autres spires. La self-inductance totale $\frac{U}{I_m \omega}$ tient compte de ces autres spires, en impliquant un courant égal dans toutes à chaque instant. Il en est tout autrement pour un transformateur lorsque les courants de capacité deviennent importants et se composent en chaque

point avec le courant suivant le conducteur. La notion de L perd toute précision et, dans chaque cas particulier, il faut examiner quelle est, faute de mieux, la meilleure valeur à choisir.

» Pour les très hautes fréquences, le fer devient à peu près sans action par suite des courants de Foucault qui s'y développent ; ainsi des tôles de 0,4 mm n'ont qu'une utilisation d'un tiers pour $f = 10\ 000$ p.s, d'un dixième pour $f = 100\ 000$ p.s. un trentième pour $f = 1\ 000\ 000$ p.s.

» Dans le cas d'une oscillation demi-onde en circuit fermé, comme sur les figures 2 et 3, les courants transitoires sont inverses dans les deux moitiés du transformateur. En ce qui concerne cette fréquence, il n'y a donc pas magnétisation générale du noyau qui n'a pas d'ampères-tours au total. Il ne peut y avoir que des magnétisations locales par fuites, et surtout des flux dans l'air.

» La perméabilité normale dans les tôles de transformateurs varie de 300 à 800 ; la section offerte au flux général dans l'air entre l'enroulement primaire et le noyau magnétique est d'un ordre égal à celle du noyau même. Dans le cas de courants inégaux dans les diverses bobines élémentaires, il y a passage de certains flux entre ces bobines élémentaires, sans que cela change beaucoup la self-inductance de chaque bobine élémentaire, déterminée comme si elle appartenait à un solénoïde général sans tenir compte du fer. La valeur de L est ainsi quelques millièmes de la self-inductance totale. Dans chaque cas particulier, on déterminera le coefficient comme on le fait dans les calculs de dispersions avec une approximation souvent assez grossière.

» Dans le cas d'une oscillation à l'ouverture, en coupant A et B de la figure 1, soit la figure 3 avec u pour i et réciproquement, les courants transitoires seront à chaque instant de même sens ; il y aura donc une certaine magnétisation générale du noyau. Le coefficient L perd beaucoup de son sens, mais si, comme approximation, on veut le conserver, il faut adopter une valeur plus grande qu'en circuit fermé, ce qui réduit la fréquence d'oscillation fondamentale et pas les autres.

» Dans le cas d'une oscillation avec un pôle restant à la terre, ou quand l'interrupteur A seul est ouvert, ce qui a lieu pour le triphasé Y en général, on a quelque chose d'analogue avec la figure 4, et réduction de la fréquence fondamentale surtout.

» Quand on passe de L à l par unité de longueur, il faut exa-

miner si cette dernière est constante ou si elle varie en suivant une certaine loi déterminée par le mode de construction.

» 5° *Valeurs à attribuer à C et C'.* — La capacité C se mesure par les méthodes usuelles. On peut la calculer en déterminant la surface d'enroulement S en regard de la masse, en y comprenant aussi bien les espaces isolants entre ces conducteurs tant qu'ils restent plus petits que la distance d à la masse, avec une constante diélectrique ϵ , par la formule approximative

$$C = \epsilon \frac{S}{d} 10^{-13} \text{ farad.}$$

» On peut avoir à considérer la capacité par rapport à l'autre enroulement jouant le même rôle que le noyau, soit seul, soit quelquefois relié à ce noyau. Dans ce dernier cas, la capacité est moindre que la somme des deux déterminées séparément.

» La capacité C' a beaucoup moins de réalité physique. Du reste, il faudrait faire entrer plusieurs capacités de cette espèce, dues aux spires successives, aux couches, aux bobines adjacentes, etc... Dans le cas le plus intéressant pour ce qui concerne la recherche des surtensions, soit celui des transformateurs de très haute tension, la construction générale tend vers de nombreuses galettes séparées les unes des autres, et alors C' tend à devenir plus précis. Il arrive même à l'être plus que C, comme nous le verrons, surtout pour les valeurs par unité de longueur c et c', en moyenne $\frac{C}{A}$ et C'A.

» 6° *Premier exemple numérique.* — Transformateur type à 2 colonnes de 100 kv-A, 50 000 v, 50 p.s.

» Courant normal, 2 A.

» Courant à vide, 0,12 A.

» Self-inductance totale = $\frac{50\ 000}{314 \times 0,12} = 1\ 300$ henrys.

» Pour l'oscillation en circuit fermé, soit demi-onde (fig. 2), on sera amené à $L = 2$ henrys (valeur dépassée dans beaucoup d'appareils).

» Résistance 200 ohms. Nombre de spires total 6 000.

» Il y a 24 galettes par noyau, 48 en tout, de 125 spires chacune, de 90 cm de longueur interne. Primaire et secondaire concentriques.

» La hauteur des galettes et de leurs intervalles est 35 cm par

noyau ; la distance à la terre (tôle ou secondaire à basse tension relié lui-même à la terre) 3,5 cm (fig. 7 et 8).

» $\epsilon = 2,7$ (huile 2,3 ; cylindres en carton 4).

$$C = 2,7 \frac{90 \cdot 35 \cdot 2}{3,5} 10^{-13} = 4,86 \cdot 10^{-10},$$

soit, avec la cuve, etc..., $C = 5 \cdot 10^{-10}$ farad, ce qui correspond bien à des mesures effectuées sur des appareils analogues.

» Les galettes sont en fil rond d'un peu moins de 1 mm de diamètre ; deux spires voisines sont distantes de 0,5 mm ; chaque spire a 95 cm de longueur moyenne ; la capacité entre ces deux spires est environ :

$$\epsilon' \frac{95 \cdot 0,1}{0,05} 10^{-13}.$$

» Il faut faire intervenir les 6 spires des couches voisines ; ies

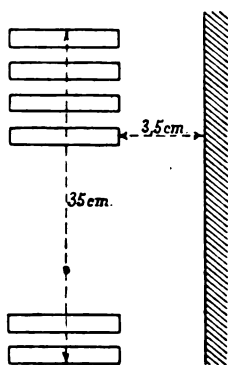


Fig. 7.

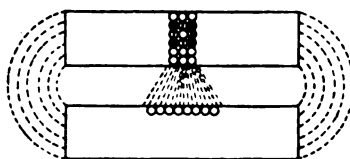


Fig. 8.

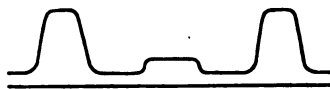


Fig. 9.

courants dus à ces capacités sont presque en phase, et on pourra, afin d'en tenir compte, assimiler leur effet à un accroissement de capacité par spire, en multipliant la valeur précédente par un nombre exprimant le rapport de la somme des tensions de ces 6 spires voisines, à la somme des tensions des deux spires immédiatement suivante et précédente, diminuée un peu à cause de distances plus grandes, ce qui peut l'amener vers 12 ; si ϵ' est vers 5, la capacité de deux spires tenant compte des couches voisines est ainsi portée à $12 \cdot 10^{-10}$; d'où on tire C' en divisant par le nombre de spires qui est 6 000 et $C' = 2 \cdot 10^{-13}$.

» Cette capacité entre spires, ainsi déterminée, ne varie guère quelle que soit la position des fils, sauf s'ils sont près de la sur-

face extérieure, où elle diminue. Mais elle y augmente par suite de la présence des bobines voisines, comme la figure 8 le montre schématiquement. La capacité linéique c' , c'est-à-dire par unité de longueur, ou par spire suivant l'unité choisie, reste donc à peu près constante.

» Au contraire, la capacité linéique c est très variable selon la position des spires. Il n'y a guère que celles qui sont en regard de l'autre surface qui agissent ; la capacité c prend donc l'aspect de la figure 9, avec maxima dûs au noyau (ou secondaire) et la cuve alternativement. Si donc on introduit dans les formules une constante $c = \frac{C}{A}$, il faut se souvenir que ce n'est qu'une approximation, et qu'une correction peut être nécessaire.

» Pour la tension et le courant normaux, les énergies accumulées dans le transformateur même sont, au maximum, pour chacune des formes : $\frac{k_0 P}{2 \pi f}$ dans le fer où k_0 est le rapport du courant magnétisant au courant total ; $\frac{k_1 P}{2 \pi f}$ dans la self-inductance de fuites totales où k_1 est le rapport de la chute de tension correspondant à $\cos \varphi = 0$ à la tension normale.

» Si en ordre de grandeur $k = k_1 = 0,05$, nous avons 16 joules pour l'une ou l'autre forme.

» Dans la capacité C à tension répartie de 0 à 50 000 $\sqrt{2}$ v, on a

$$\frac{1}{3} 5 \cdot 10^{10} \cdot 50\,000^2 = 0,4 \text{ joule,}$$

et dans la capacité C' ,

$$2 \cdot 10^{13} \cdot 50\,000^2 = 0,0005 \text{ joule}$$

» La fréquence critique pour laquelle le mode de propagation change est

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC'}} = 250\,000 \text{ p : s.}$$

» La résonance en demi-onde a lieu pour la fréquence f_0 , oscillation naturelle en circuit fermé,

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}} = \text{environ } 16\,000 \text{ p : s.}$$

» En tenant compte de la capacité c' les fréquences f'_0 d'oscillations harmoniques sont :

p	f'_0	p	f'_0
1	15 850	11	143 000
2	31 400	12	151 000
3	46 500	14	166 500
4	61 300	16	178 000
5	75 300	18	188 000
6	88 500	20	196 000
7	101 000	25	210 000
8	113 000	30	221 000
9	123 000	∞	250 000
10	133 700		

» Ces ondes se présentent comme sur la figure 3, bien que les fréquences ne soient pas des multiples exacts de la fréquence fondamentale, mais la vitesse de propagation varie également, les longueurs d'onde restant $\frac{2A}{p} = \frac{10\ 800}{p}$ mètres.

» 7° *Deuxième exemple numérique.* — Transformateur type à 2 colonnes de 10 000 kv-A, 100 000 v, 50 p:s ;

» Courant normal, 100 A.

» Courant à vide, 5 A.

» Self-inductance totale $\frac{100\ 000}{314 \times 5} = 64$ henrys.

» Pour l'oscillation en circuit fermé, soit demi-onde (fig. 2), on sera amené à environ $L = 0,1$ henry (quelquefois un peu plus).

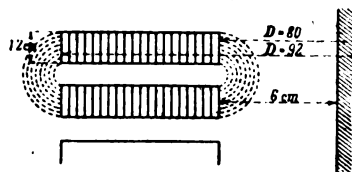


Fig. 10.

» Résistance 4 ohms. Primaire et secondaire concentriques.

» Il y a 50 galettes par noyau, 100 en tout, de 20 spires chacune en lame de $1,2\text{ cm} \times 0,22$ (fig. 10). Le diamètre intérieur est de 80 cm ; la hauteur de l'enroulement, vides compris, 110 cm par noyau. Les tôles, ou le circuit secondaire supposé à la masse, étant à 6 cm, nous aurons, avec $\varepsilon = 3$,

$$C = 3 \frac{\pi \cdot 80 \cdot 110 \cdot 2}{6} 10^{-18} = 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ farad.}$$

et en ajoutant la part de la cuve, etc..., $3 \cdot 10^{-9}$.

» Si l'isolant entre spires a 1 mm, la capacité entre spires sera avec $\epsilon' = 3$ également (coton imprégné d'huile),

$$3 \frac{\pi \cdot 86 \cdot 1,2}{0,1}$$

et, en divisant par le nombre de spires,

$$C' = 4,85 \text{ soit } 5 \cdot 10^{-13} \text{ farad.}$$

» On fera les mêmes remarques que précédemment à propos de la constance de c et c' . La capacité entre spires sera presque une constante d'un bout à l'autre, car, aux extrémités, la surface offerte au courant de charge est considérable ; entre galettes, il y a peu, car les conducteurs se présentent par leur tranche mince. Nous avons un peu augmenté C' pour en tenir compte.

» Pour la tension et le courant normaux, les énergies dans le fer et dans la self-inductance de fuites sont de l'ordre de 1 000 à 1 500 joules. Dans la capacité C , on n'a que 10 joules et dans C' , 0,005 joule.

» La fréquence critique est

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC'}} = 700\,000 \text{ p : s.}$$

» La fréquence fondamentale d'oscillation en circuit fermé est :

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{LC}} = 29\,000 \text{ p : s}$$

avec mêmes remarques que dans le cas précédent.

» 8° *Remarques sur la grandeur de f_0 .*— Nous avons pris ci-dessus des valeurs de L plutôt petites. Elles correspondent à ce que l'on a avec des transformateurs à faible dispersion. Quand on admet des flux dans l'air plus importants, comme c'est la tendance actuelle, L tel que nous l'envisageons, augmente aussi, et cela peut faire diminuer la fréquence de l'oscillation naturelle fondamentale, vers la moitié, quelquefois moins, des chiffres ci-dessus. Cela ne change d'ailleurs pas sensiblement les conclusions ultérieures en tant que remarques intéressant le constructeur. Des expériences suffisantes de détermination directe de f_0 manquent, au moins à ma connaissance. On a publié quelques chiffres aux Etats-Unis, qui sont du même ordre que ceux que nous indiquons.

» Si la puissance baisse, la fréquence f_0 diminue. Quand on arrive aux transformateurs de l'ordre de quelques kilowatts, à la tension de 100 000 v, le flux dans l'air atteint une proportion

beaucoup plus grande du flux total ; f_0 peut s'abaisser alors jusqu'à atteindre l'ordre de quelques milliers ou même moins.

» 9° *Transformateurs de tensions plus faibles.* — Le coefficient L est proportionnel au carré de la tension ; la capacité à la masse ne baisse que peu avec la tension. La fréquence d'oscillation f_0 augmente donc beaucoup aux tensions plus basses, presque comme l'abaissement de la tension. Ainsi, les transformateurs ci-dessus : 100 kv-A et 10 000 kv-A, à 5 000 v et 10 000 v auraient des fréquences d'oscillation qui arriveraient à l'ordre des centaines de mille.

» C' varie suivant le genre de construction ; avec des rubans, comme on tend à le faire de plus en plus actuellement, la capacité entre deux spires est presque indépendante de la tension ; le nombre de spires est proportionnel à la tension ; c' est donc inversement proportionnel à la tension, de sorte que f_c est proportionnel à peu près à la racine carrée de l'inverse de la tension. On atteint ainsi des millions aux tensions moyennement élevées.

» 10° *Oscillations transitoires à la fermeture.* — Il y a superposition, à la tension appliquée, d'une onde de fréquence f_0 et divers harmoniques qui s'atténue rapidement. On sait que, dans le cas de capacités non réparties, on a au plus le double de la tension appliquée aux bornes du condensateur pendant un temps très court ; cela tient à ce que, lors de la fermeture au temps $t = 0$, le condensateur n'est pas chargé, le courant est nul ; le terme transitoire de tension aux bornes du condensateur, qui dure tant que le courant n'est pas établi définitivement, est donc tel qu'il compense pour $t = 0$ la tension de régime, c'est-à-dire qu'il est égal et de sens inverse ; comme il est de fréquence différente, si l'amortissement n'est pas très grand, il peut donc se créer une tension double de la valeur de régime.

» Le même raisonnement s'applique au cas de capacité répartie. Si on a pénétré dans l'enroulement assez pour que la capacité devienne appréciable, on trouve, en chaque point, des termes transitoires de fréquence f_0 et f'_0 qui sont au total égaux et opposés à la tension permanente correspondant à la tension appliquée. Au bout d'un temps assez court, sauf amortissement toujours grand, on pourra ainsi doubler environ, rarement augmenter un peu plus, les valeurs de régime à cause des différences entre f_0 ou f'_0 et la fréquence appliquée.

» Si le réseau n'est pas indéfini, ses constantes entrent dans la

valeur de f_0 qui se trouve modifiée ; cela ne change pas l'ordre du double pour les surtensions extrêmes. Si le secondaire est fermé, la fréquence peut changer, mais l'amortissement de l'oscillation transitoire augmente.

» Tout ceci n'est vrai, bien entendu, que si la fréquence f_0 d'oscillation ou l'un de ses harmoniques ne se trouvent pas dans la tension appliquée.

» 11° *Oscillations transitoires à l'ouverture.* — Les surtensions aux ouvertures de circuit sont bien difficiles à calculer exactement. On leur a attribué quelquefois des valeurs colossales en négligeant les amortissements et en supposant la rupture effectuée quand le courant est voisin de sa valeur maximum ; elles disparaissent si la rupture est faite aux environs du zéro ; on admet souvent que c'est le cas avec les interrupteurs à huile, tandis qu'une rupture dans l'air, comme celle d'un arc, sous l'action d'un violent courant d'air peut se faire à un moment presque quelconque.

» Si l'on écrit simplement que l'énergie qui peut être accumulée dans l'inductance interne et externe entre intégralement dans la capacité au bout de $1/4$ de période de l'oscillation, on trouve des surtensions énormes, car les inductances sont assez grandes et les capacités très petites (voir ces énergies aux § 6 et 7). Si l'on fait intervenir les pertes dans le fer, lequel doit être entièrement démagnétisé quand le condensateur est chargé complètement, on trouve qu'elles suffisent souvent pour absorber l'énergie libérée sans qu'il y ait production d'oscillation ni de surtensions, le transformateur étant coupé soit à vide, soit en charge normale. Ce ne serait qu'en cas de rupture de fortes surcharges que l'on pourrait craindre des surtensions considérables si on coupe le courant presque instantanément aux environs de son maximum. En pratique, on a, en général, satisfaction avec les interrupteurs à huile et les accidents résultant des ouvertures n'existent à peu près pas avec l'appareillage moderne et des précautions convenables.

» On voit facilement aussi que, si on a une surtension à la rupture, laquelle se manifeste aux bornes mêmes, il en résulte une étincelle dans l'huile envoyant du courant dans le réseau ; il suffit que cette étincelle soit susceptible de chauffer quelques centimètres cubes d'huile de quelques degrés aux environs des contacts pour que cela représente un sérieux amortissement.

12° *Rôle des limiteurs de tension. Parafoudres.* — Des ondes de fréquence et de tension élevées peuvent arriver aux bornes des transformateurs et pénétrer dans leur enroulement. Il y a lieu de les diviser en deux classes, selon leur tension ; ou bien elles sont de tension très élevée, beaucoup plus élevée qu'on ne peut demander raisonnablement aux transformateurs de supporter impunément, et alors il convient de les éliminer par des artifices spéciaux qui sont en dehors de notre sujet ; ou bien ce sont des tensions normales ou des surtensions modérées insensibles aux appareils de protection normaux, qui pénètrent dans les transformateurs où, par défaut de répartition uniforme, par résonances, elles créent des surtensions internes et peuvent avoir des effets destructifs. Ce sont les seules à examiner ici.

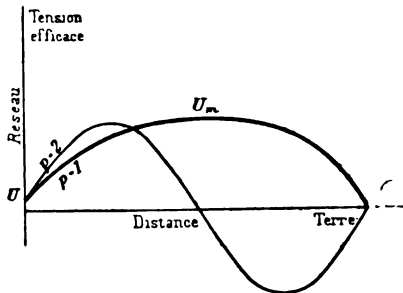


Fig. 11.

» 13° *Résonances en régime permanent.* — La fréquence f_0 ou un harmonique f' , se présente à l'entrée du transformateur. Elle entre en résonance. Pour f_0 , on aura le haut de la figure 2, ou plutôt la figure 11, introduisant à l'origine une tension raisonnable U parasite, d'où superposition à la tension normale de U_m au milieu. Si on ne tient pas compte de la résistance et, en général, des pertes d'énergie, $U_m = \infty$.

» Si on tient compte de la résistance,

$$U_m = U \frac{2}{R \sqrt{\frac{C}{L}}}$$

(L étant corrigé, si nécessaire, de $1 - 4\pi^2 f^2 LC$).

» Si on tient compte de la conductance de fuites de courant G ,

$$U_m = U \frac{2}{R \sqrt{\frac{C}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

R devra être pris plus grand qu'aux fréquences ordinaires, à

cause de l'effet de peau dès que la fréquence est assez élevée. Pour les valeurs de f_0 calculées aux § 6 et 7 pour les transformateurs de 100 et 10 000 kv-A, nous porterons R de 200 à 500 ohms, et de 4 à 10 ohms respectivement.

» G englobant les pertes de courant et d'hystérésis diélectrique se déterminera par l'expérience en alimentant entre l'enroulement et la masse à tension donnée et notant la puissance absorbée. G ne correspond pas au fonctionnement normal où la tension varie progressivement jusqu'à zéro, mais à la perte W sous une tension uniforme U , $W = U^2 G$, qui est trois fois plus grande que la perte normale sous tension variant linéairement de U à zéro.

» La dissipation totale normale dans un transformateur de haute tension, d'ailleurs très variable avec la température, est au-dessous de 1 pour 1 000, quoique l'on ait quelquefois donné un peu plus. En faisant une supposition plus ou moins basée sur l'expérience, quant à la valeur normale de ces pertes, comme 0,4 pour 1 000, on en tire une valeur de G . Mais on doit, dans notre formule, la majorer encore puisque nous recherchons les valeurs extrêmes des surtensions, celles qui sont dangereuses : G augmente rapidement alors par des effluves, des dérivations le long des surfaces, les enroulements des isolants. On peut, en ordre de grandeur, le multiplier par 3 ou 4 probablement. Pour nos deux transformateurs, nous serons ainsi amenés à $G = 2.10^{-7}$ et $G = 0,5.10^{-5}$, ce qui nous donnera :

		Transformateur de 100 kv-A	Transformateur de 10 000 kv-A
Surtension	sans R ni G	∞	∞
—	avec R sans G	255	1 150
—	avec R et G	97	65

» Tout ceci n'a pas très grande précision, mais montre l'influence considérable des amortissements, probablement plus grands encore que ce que nous avons supposé.

» Mais il faut regarder aussi les courants. L'intensité à l'entrée est

$$\sqrt{\frac{C}{L}} U_m.$$

» Pour le transformateur de 100 kv-A, si on admet la surtension 97 ci-dessus, et qu'on ne veuille pas dépasser 1,5 fois la tension normale pour l'harmonique, soit $50\,000 \times 1,5 = 75\,000$ v, il ne

faudra pas que la tension arrivant à l'entrée de la fréquence $f_0 = 16\ 000$ p:s, dépasse 775 v. Le courant sera de 1,2 A, soit 60 pour 100 du courant normal.

» Remarquons que, pour une surtension U_m donnée, le courant absorbé est indépendant du coefficient de surtension et de ses variations par dissipation d'énergie, lequel ne fait varier que la tension à l'entrée nécessaire pour avoir U . L'imprécision du coefficient de surtension ne change donc pas ce qui suit.

» Si la source de l'harmonique est à une distance telle que l'inductance des conducteurs et des appareils insérés (transformateurs de courant, ligne, bobines de réactance) corresponde à seulement 1 pour 100 de la tension normale en marche et charge normale, soit 500 v, on montera à $500 \times \frac{16\ 000}{50} \times 0,6 = 96\ 000$ v, maintenant, sans tenir compte des importantes pertes dans cette courte transmission. La source devrait donc être de l'ordre de 100 000 v au moins. D'autres appareils que les transformateurs

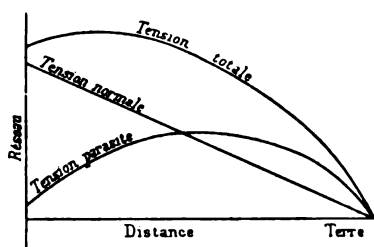


Fig. 12.

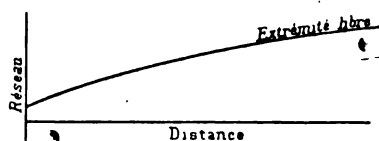


Fig. 13.

seraient en péril ; des limiteurs de tension convenables doivent faire disparaître cette onde parasite. Le danger de résonance ne peut donc exister réellement que si la source de tension élevée est aux bornes mêmes du transformateur. Dans ce cas extrêmement rare, son isolement risque d'être perforé entre la borne d'entrée et le milieu (fig. 12).

» Pour le transformateur de 10 000 kv-A, le courant serait 26 A, à la fréquence $f_0 = 29\ 000$ p:s ; à une distance correspondant à seulement 1 pour 100 de chute à fréquence et charge normales, il faudrait 156 000 v pour obtenir 2 300 v aux bornes et 150 000 v au milieu.

» Au lieu de la fréquence fondamentale, il peut se présenter une fréquence harmonique. On trouve les mêmes chiffres que ci-dessus à peu près pour ce qui se passe dans le transformateur, mais les

perles en ligne sont accrues comme la grandeur de la fréquence parasite.

» L'onde parasite peut elle-même comporter diverses fréquences qui résonent séparément en donnant des surtensions de forme complexe et appelant des conclusions analogues.

» Les transformateurs sur réseaux à tension inférieure, protégés proportionnellement à leur tension, sont dans de meilleures conditions à cause de l'augmentation de la fréquence f_0 susceptible de résoner.

» 14° *Résonance spéciale avec un seul pôle relié au réseau et l'autre libre.* — L'oscillation est alors en quart-d'onde, comme une barre dont un seul bout est encastré (fig. 13) et pour l'oscillation fondamentale

$$f_0 = \frac{1}{4\sqrt{LC}}$$

» Mais alors, le courant étant partout de même sens, et à condition que la fréquence reste faible, on sera amené à choisir L bien plus grand, car il y a magnétisation générale du circuit magnétique, ce qui conduira quelquefois à des surtensions dangereuses.

» En pratique, on obtiendra cela lorsqu'un transformateur doit être coupé par un interrupteur qui fonctionne mal et laisse écouler un temps appréciable entre les deux ruptures. On l'obtiendra aussi en essayant un transformateur à la masse avec réunion aux deux pôles du transformateur d'essai, d'une part, d'une seule borne du circuit à haute tension du transformateur à essayer, et, de l'autre, du secondaire et des tôles réunies.

» On l'obtiendra encore lorsque, par suite des prises de courant pratiquées en cours d'enroulement, on laisse une portion de transformateur inutilisée avec un bout relié à la ligne (ce cas est généralement moins dangereux, car il conduit à des fréquences très élevées.)

» Reprenons le transformateur de 100 kv-A, 50 000 v, qui a $L = 1\,300$ henrys pour self-inductance totale ; supposons qu'on ait 650 dans le cas de l'essai à la masse décrit ci-dessus. La surtension sera

$$\frac{2}{R\sqrt{\frac{C}{L}} + G\sqrt{\frac{L}{C}}}$$

» Si on néglige G , elle monte à 11 500 fois la tension appli-

quée ; avec $G = 2.10^{-7}$ mho, elle tombe à 9. La fréquence est $f_0 = 450$ p:s, c'est-à-dire que, si la courbe d'essai contient l'harmonique d'ordre 9, celui-ci se retrouve bien plus important à l'extrémité libre.

» Si le transformateur était fait avec enroulements alternés, sa capacité C pourrait atteindre 40.10^{-10} farad, et ce serait $f_0 = 150$ p:s qui résonerait, c'est-à-dire l'harmonique 3 introduit par la saturation des transformateurs d'essai. Il est donc préférable d'éviter qu'un transformateur soit alimenté de cette manière.

» 15° *Surtensions entre spires, couches... hors de la résonance : Fréquences moyennement élevées.* — Ces surtensions se produisent aux fréquences élevées quand le courant de capacité devient de l'ordre du courant qui suit l'enroulement, celui-ci devant alors variable avec la distance des extrémités.

» Ces fréquences ne se trouvent pas en permanence dans les ré-

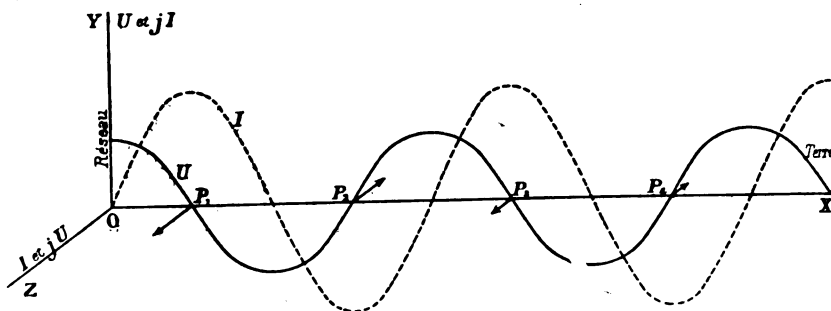


Fig. 14.

seaux industriels. Cependant, elle se rencontrent lors des oscillations dues aux manœuvres ; elles résultent aussi des perturbations atmosphériques. Nous supposons toujours des limiteurs qui empêchent l'arrivée aux bornes du transformateur de toutes surtensions exagérées.

» Revenons à l'appareil de 100 kv-A, 50 000 v. Au § 6, nous avons vu que les fréquences f_0 qui résonent se resserrent de plus en plus. Les valeurs de l , c , c' , r sont loin d'être bien définies ; elles varient autour de certaines valeurs et peuvent ainsi s'adapter à la résonance ; à partir de 200 000 p:s, il suffit d'une adaptation de 0,5 pour 100. Pour 120 000, il suffit de 4 pour 100. Nous admettons ainsi que, de 120 000 à 250 000 p:s, il y a résonance permanente, cas traité au § 13, sauf à revenir ultérieurement sur ce qui se passe aux environs de la fréquence critique 250 000 p:s.

» Au-dessous de 120 000 p:s, il y a 8 fois résonance et alors toujours un courant assez grand pour empêcher la transmission depuis une source de l'onde parasite, même peu éloignée.

» Mais entre ces fréquences de résonance le courant diminue, et, en particulier, devient très faible aux valeurs moyennes correspondant à $(2p + 1)$ quarts d'onde. Pour un certain nombre de fréquences, la tension qui arrive aux bornes du transformateur peut alors être celle de la source, même placée un peu loin ou ce qu'en laissent passer les limiteurs. On a ainsi la figure 14 ou plus exactement une autre, obtenue par le gauchissement de cette sinusoïde passant alternativement en avant et en arrière du plan de la figure, soit suivant OZ, et le sens des flèches ; ce déplacement, faible dans notre cas, correspond à la puissance transportée, c'est-à-dire les pertes du transformateur et s'atténue d'un bout à l'autre.

» La distance $P_1 P_2$ est, pour ce transformateur, $\frac{10800}{p}$ mètres

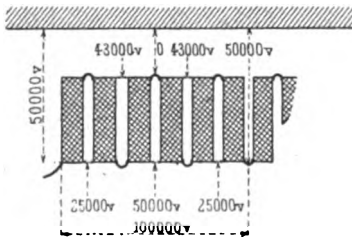


Fig. 15.

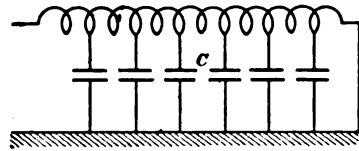


Fig. 16.

comme nous l'avons vu. Pour la fréquence 120 000 p:s environ, soit 17 quarts d'onde et $p = 8$; $P_1 P_2 = 1\,350$ mètres, c'est-à-dire que, entre des points distants de 338 mètres en suivant le fil, on aura la tension totale ; cela fait 375 spires ou 3 galettes. On obtiendra ainsi des tensions parasites, pour une onde parasite de 50 000 v, à fréquence 120 000 p:s que laissent passer les appareils de sécurité, avec la disposition schématisée de la figure 15.

» Le courant est seulement alors 0,01 A et peut venir d'assez loin, même à fréquence 120 000. (Remarquons que ce courant en phase avec la tension aux bornes doit représenter les pertes, tout au plus de l'ordre de 1 pour 100, dues à la propagation du courant de haute fréquence et aux pertes dans les diélectriques. On les fournit maintenant à haute tension, soit 50 000 v au lieu de les fournir à une tension beaucoup plus réduite comme 775 v dans le cas de résonance du § 13). Des bobines de réaction ne l'arrêtent

que peu. L'onde se propage d'un bout à l'autre de l'enroulement, presque sans atténuation, même si une extrémité est un point neutre relié à la terre. Une telle distribution est susceptible de déterminer des accidents, non seulement à la masse, mais entre spires et couches. On aurait environ comme valeurs extrêmes, dans le cas précédent, 200 v entre spires voisines, et 2 500 v entre couches adjacentes. Cela ne représente pas des difficultés d'isolement considérables, mais elles existent cependant, surtout pour les spires extrêmes le long des surfaces, si on ne veut pas enranger complètement la bobine pour qu'elle se refroidisse mieux.

» Ce transformateur de 100 kv-A, choisi intentionnellement, est d'ailleurs en assez mauvaises conditions.

» Si on suivait la règle de certaines maisons amenées par la pratique à ne pas faire dans un tel cas de bobines élémentaires de tension dépassant 750 v, 500 même, au lieu de 48 divisions

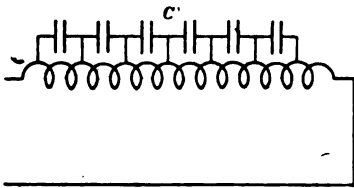


Fig. 17.

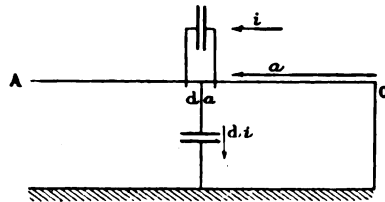


Fig. 18.

pour 50 000 v, on en aurait presque le double, d'où des surtensions calculées comme ci-dessus beaucoup plus faibles.

» 16° *Fréquences très élevées.* — Passons tout de suite à la limite avec une fréquence extrêmement ou infiniment haute.

» Supposons des capacités C seules ; un condensateur se comporte, aux hautes fréquences, presque comme un court-circuit ; au contraire, l'impédance de l'enroulement est énorme. La tension totale (fig. 16) tend donc à se porter presque entièrement sur les premiers condensateurs reliés à la ligne. Plus la capacité C est grande, plus cet effet est marqué.

» Supposons les capacités C' seules (fig. 17), tous les condensateurs élémentaires sont parcourus par le même courant à peu près. Il y a donc tensions égales aux bornes d'éléments égaux, d'où une répartition de tension uniforme, et d'autant plus que C' est plus grand si C existe en même temps. Plus $\frac{C}{C'}$ sera grand,

plus le danger d'accumulation de tension à l'entrée sera considérable.

» En négligeant le courant dans l'enroulement, on a (fig. 18) :

$$i = C' \frac{A}{da} \cdot \frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial a} da \right)}{\partial t},$$

$$di = \frac{C}{A} da \cdot \frac{\partial u}{\partial t},$$

d'où on tire facilement :

$$\left. \begin{aligned} i &= A' \frac{C'}{C} \frac{\partial^2 i}{\partial a^2} \\ u &= A' \frac{C'}{C} \frac{\partial^2 u}{\partial a^2} \end{aligned} \right\} \text{équations indépendantes du temps.}$$

» La tension en chaque point sera :

$$u = \frac{u_1}{e^{\sqrt{\frac{C}{C'}}} - e^{-\sqrt{\frac{C}{C'}}}} \left(e^{\frac{1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}} a} - e^{-\frac{1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}} a} \right),$$

qu'on peut écrire également sous forme de fonctions hyperboliques.

» La tension locale entre spires :

$$\frac{\partial u}{\partial a} = \frac{u_1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}} \frac{e^{\frac{1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}} a} + e^{-\frac{1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}} a}}{e^{\sqrt{\frac{C}{C'}}} - e^{-\sqrt{\frac{C}{C'}}}}$$

qui est maximum à l'entrée jointe à la ligne.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial a} \right)_A = \frac{u_1}{A} \sqrt{\frac{C}{C'}},$$

soit la tension moyenne multipliée par $\sqrt{\frac{C}{C'}}$, en valeurs instantanées ou efficaces.

» Au lieu d'une propagation comme au § 2, on a à chaque instant une courbe de genre exponentiel, oscillant avec le temps jus-

qu'à deux positions extrêmes avec la fréquence appliquée, et sur laquelle se trouvent les tensions de chaque point (fig. 19).

» Prenons notre transformateur de 100 kv-A ; $\sqrt{\frac{C}{C'}} = 50$. La tension à l'entrée pour les fréquences très élevées est 50 fois la tension moyenne obtenue en divisant la tension totale par le nombre de spires. Mais en réalité, à cause de la mauvaise répartition de C (fig. 9), $\sqrt{\frac{C}{C'}}$ oscille entre deux valeurs dont 50 est la moyenne, mais très variables. Il en résulte que la courbe de la figure 19 procède par bonds successifs déterminant des tensions entre spires plus grandes en certains points. On peut probablement admettre 2 à 5 fois la valeur moyenne dans un tel cas ; adoptons 200.

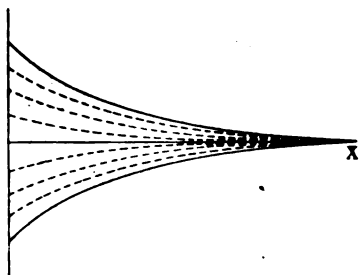


Fig. 19.

» Si une surtension parasite de 50 000 v et de très haute fréquence, plus grande que 250 000 p:s, pour ce transformateur, se présente à l'entrée, il y aura $\frac{50\,000}{6\,000} \times 200 = 1\,700$ v par spire près de l'entrée, soit de l'ordre de 10 000 v entre couches.

» Cela conduit à renforcer l'isolement des premières spires, donc à les éloigner. Mais alors leur capacité c' diminue localement et proportionnellement à la réduction du nombre de spires dans un volume donné, ce qui peut amener à 3 ou 4 fois plus encore pour la surtension. Il faut naturellement que la qualité de l'isolant introduit fasse plus que compenser l'augmentation de tension localement accumulée.

» Prenons le transformateur de 10 000 kv-A ; $\sqrt{\frac{C}{C'}} = 80$.

» Si une fréquence plus haute que 700 000 p:s se présente, avec

tension de 100 000 v, en admettant le même facteur 4 pour la mauvaise répartition de C , on obtient à l'entrée :

$$\frac{100\ 000}{2\ 000} \times 320 = 16\ 000 \text{ v par spire,}$$

et comme on renforcera l'isolement, d'où diminution de c' , on arrive à craindre la production de l'ordre de 50 000 v par spire.

» Quand la tension normale du réseau diminue, le danger relatif devient moins grand ; les ondes qui se présentent, filtrées par des limiteurs appropriés, sont proportionnelles à cette tension, le nombre de spires également. La moyenne $\frac{U}{A}$ reste donc la même ; mais le rapport $\sqrt{\frac{C}{C'}}$, diminue avec la tension, car C' augmente par réduction du nombre de spires.

» De même, le danger augmente avec la puissance, car $\frac{U}{A}$ augmente comme le flux et la réduction de $\sqrt{\frac{C}{C'}}$ ne fait pas compensation.

» Le danger se manifeste donc davantage lorsque les transformateurs sont plus puissants et de tension plus élevée, d'autant plus que la fréquence critique diminue en même temps.

» 17° *Impulsions brusques de tension.* — Dans le cas de charges brusques, c'est-à-dire de variation soudaine du potentiel à l'entrée déterminée par la fermeture d'un interrupteur proche au moment où la tension est voisine de son maximum, ou par une perturbation atmosphérique, on peut remarquer que, pendant les premiers instants, une self-induction oppose une résistance presque infinie, tandis que des condensateurs se comportent presque comme des courts-circuits. Il en résulte donc qu'on aura, en régime transitoire, pendant ces premiers instants, une répartition analogue à celle du paragraphe précédent. Même avec une fréquence basse appliquée (fermeture d'interrupteur), on aura cette distribution exponentielle, se limitant pratiquement à un certain nombre des premières spires, et précédant les oscillations exposées au § 9 où on suppose la tension appliquée instantanément aux bornes, tandis qu'elle ne l'est qu'avec un certain $\frac{du}{dt}$, très considérable d'ailleurs.

» Dans le cas d'un coup de foudre, on pourra avoir une charge très soudaine de tension continue ou pseudo-continue, puis des

fréquences très élevées s'abaissant quelquefois beaucoup, et la répartition restera avec tension accumulée à l'entrée tant qu'on sera au-dessus de la fréquence critique.

» 18° *Fréquence critique.* — La fréquence critique, vue comme elle se présente en partant des basses fréquences, correspond à la propagation sinusoïdale avec vitesse qui devient progressivement nulle, soit annulation de la longueur d'onde. Mais quand on remplace L par $\frac{L}{1 - LC'\omega^2}$ et que ω croît, le facteur de surtension diminue graduellement. De plus, l'amortissement progressif, en s'enfonçant dans l'enroulement, faible au § 15, devient rapidement grand quand on approche de f_c ; il tend vers ∞ .

» Les ondes finissent donc avec f croissant près de f_c par entrer très peu et à la limite plus du tout. A ce moment, toute la tension serait accumulée sur une longueur infime de conducteur; mais s'il en est ainsi, les notions de l et c disparaissent, puisqu'il n'y a plus d'enroulement qui compte, et alors il devrait y avoir pénétration aisée. Il s'établit donc un compromis et, en fait, il y a toujours répartition de la tension sur une certaine longueur. Mais il peut probablement en résulter, dans certains cas, des $\frac{\partial u}{\partial a}$ près de la ligne atteignant ceux que l'on calcule avec $f = \infty$ comme ci-dessus, soit presque l'ordre de grandeur quelquefois de la tension totale appliquée à la première spire. Il faut noter cependant qu'il n'y a pas, en général, une capacité C' à considérer, mais un ensemble de capacités du genre C' , ce qui amène à un ensemble de fréquences critiques sans netteté (§ 21).

» 19° *Dispositions pratiques.* — Nous avons vu qu'on renforce l'isolement des premières spires, mais il ne faut pas oublier que c'est une arme à deux tranchants, et qu'on augmente les surtensions en même temps qu'on les combat.

» La formule du § 16 donne $\frac{\partial u}{\partial a}$ à toute distance dans l'enroulement et permet d'apprécier comment il faut faire décroître cet isolement supplémentaire et jusqu'où il faut le prolonger. En pratique, on va souvent à $1/20$ et même $1/10$ de l'enroulement. Naturellement, si le transformateur a les deux bouts isolés, il faut renforcer l'isolement aux deux extrémités.

» Dans le cas d'une extrémité à la terre, on renforce aussi

parfois l'isolement de quelques bobines de ce côté également, mais beaucoup moins que de l'autre. Cela peut être prudent, notamment si la terre du neutre du transformateur présente une certaine résistance ou impédance qui lui donne une fonction partielle d'extrémité isolée. La même chose se fait quelquefois pour le neutre des transformateurs triphasés Y.

» Certains constructeurs détachent complètement la première spire : elle devient un anneau plat fendu placé au voisinage de la première galette, dont elle est très fortement isolée. On peut attribuer encore à cette addition un certain accroissement favorable de la capacité C' entre spires locales, ou, ce qui revient au même, dire que cette grande surface équipotentielle voisine des spires, ayant par rapport à elles une capacité appréciable pour des fréquences très élevées, tend ainsi à égaliser le potentiel entre elles. Cette surface a été prolongée quelquefois sous forme d'une sorte de cloche entourant les premières bobines.

» On a proposé d'ajouter à l'extérieur du transformateur des bobines dites de choc à isolement renforcé. Elles ne peuvent constituer une protection toujours efficace contre la mauvaise répartition des tensions internes, car elles n'agissent qu'en réduisant la tension aux bornes du transformateur.

» Quant aux enroulements de transformateurs, la pratique a amené à des dispositions, de plus en plus adoptées généralement, qui se justifient par ce que nous venons de dire. L'enroulement à haute tension est très divisé : un grand nombre de bobines et galettes élémentaires minces sont séparées les unes des autres par un intervalle d'huile de l'ordre du centimètre, très efficace pour le refroidissement, et assurant l'isolement pour une surtension parasite allant à plus de 50 000 v, surtout pendant un temps court.

» Dans chaque bobine ou galette, on ne détermine pas de tensions considérables entre couches, en adoptant un conducteur qui forme toute la hauteur de la bobine, soit un ruban plat souvent de 7 à 15 mm sur 0,5 à 2 mm, qui a l'avantage d'être très facile à enrouler. On a ainsi à envisager seulement les tensions entre spires successives. La capacité entre spires est assez grande et bien répartie.

« Pour une tension de service donnée, la fréquence critique augmente généralement quand la puissance augmente. Il en résulte que, dans une certaine étendue de fréquences élevées (ou

de rapidités d'établissement d'une tension, ce qu'on appelle souvent raideur d'un front d'onde), les transformateurs de faible puissance se trouvent au-dessous de leur fréquence critique et se comportent comme indiqué au paragraphe 16, tandis que ceux de forte puissance se trouvent au-dessous de leur fréquence critique et se comportent comme indiqué au paragraphe 15. Il est vraisemblable que, dans la pratique, les fréquences critiques et les oscillations qui ont lieu ont des grandeurs telles que ceci se produit réellement. Alors, les transformateurs de faible puissance ont une tendance plus marquée aux accidents limités près des bornes, tandis que dans ceux de forte puissance les surtensions loin des bornes se manifestent davantage. Ces faits ont été observés de divers côtés.

» 20° *Théorie générale.* — Nous avons examiné les ondes de toutes fréquences au-dessus et au-dessous de la fréquence critique, en raccordant ces deux parties par la fin du § 3 seulement. Sous cette forme élémentaire d'exposition, ce raccordement est forcément sacrifié ; il peut être intéressant d'établir une formule générale qui contiendra ce qui se passe en toutes conditions et à toutes fréquences.

» Les équations dont nous nous sommes servis pour avoir les fréquences, tensions, etc., viennent de l'intégration de l'équation connue, dite des télégraphistes :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \dots,$$

en négligeant la résistance.

» Si on la néglige encore, en faisant de plus certaines hypothèses simplificatrices, on arrive, en introduisant la capacité entre spires, à :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = lc \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - lc' \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^4}.$$

» Notre collègue Langevin nous a indiqué un procédé qui permet d'arriver à la solution générale à l'aide de développements en série. On peut ainsi poser tous les termes du problème et, dans chaque cas particulier, laisser de côté en cours de route, ceux qui sont d'importance assez faible. La solution générale nécessiterait des termes dont l'écriture serait pénible et il serait malaisé de la mener à bout. Voici comment elle peut être esquissée dans cette voie.

» Considérons un élément de conducteur et ses deux voisins (fig. 20); développons les deux différences de potentiel Δu_1 et Δu_2 par la formule de Taylor :

$$\Delta u_1 = X \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{X^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{X^3}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \frac{X^4}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \dots$$

$$\Delta u_2 = -X \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{X^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{X^3}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \frac{X^4}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - \dots$$

$$\Delta u_1 + \Delta u_2 = X^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{X^4}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \dots$$

X est la longueur d'une spire ou, en général, du conducteur entre éléments rendus voisins par le mode de construction.

» Il peut y avoir, de par ce mode, toute une série de conducteurs rendus voisins de l'élément considéré suivant une certaine loi ou de certaines lois (spires, couches, bobines...) ; il y aura donc une série de termes de cette nature dont il faudra considérer la somme.

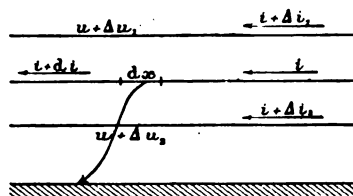


Fig. 20.

» N'en écrivons qu'un pour ne pas surcharger le développement du calcul :

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -c \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma \left[\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots \right] - gu,$$

en abandonnant les termes en $\partial^3 u$ sur lesquels on pourrait revenir.

» $\frac{\gamma}{X^2}$ est la capacité entre éléments voisins par unité de longueur ; comme nous le disons ci-dessus, on pourrait écrire :

$$\sum \gamma_1 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots$$

» g est la conductance de fuites de courant.

» De même, par un développement semblable :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -l \frac{\partial i}{\partial t} - \mu \left[\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots \right] - ri.$$

μ caractérise des inductions mutuelles, et on devra s'arrêter plus

ou moins loin dans le développement et aussi recourir à des sommes pour les spires, couches, bobines... Ces termes en μ sont des correctifs, apportés à ceux en l , qui tiennent compte de ce que le courant n'est pas le même dans les spires voisines, en introduisant $\Delta i_1 + \Delta i_2$ comme ci-dessus $\Delta u_1 + \Delta u_2$.

» On tire de là :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = rgu + (rc + lg) \frac{\partial u}{\partial t} + lc \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (\mu g - r\gamma) \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + (\mu c - \gamma l) \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} + \dots$$

» Développons la tension de chaque point en série ; nous aurons une suite de termes de la forme imaginaire :

$$ve^{j\omega t},$$

v n'étant pas fonction du temps.

» Pour chacun d'eux, nous aurons :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} [1 - j(\mu g - r\gamma)\omega + (\mu c - \gamma l)\omega^2] = v [rg + j(rc + lg)\omega - lc\omega^2]$$

» [Si nous ne tenons pas compte de μ et g et si ω devient très grand, nous avons :

$$\gamma \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = vc.$$

» En nous reportant à nos notations $c = \frac{C}{A}$, s'il y a N spires dans l'enroulement, $NX = A$.

» La capacité entre éléments est $\frac{\gamma}{X}$; celle d'une spire et sa voisine :

$$\frac{\gamma}{X} = C'N,$$

d'où :

$$v = A^2 \frac{C'}{C} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

identique à ce que donnait la théorie élémentaire avec $\omega = \infty$ (§ 16).]

» La différence $\mu c - \gamma l$ devient, en remarquant que si l'inductance mutuelle M_1 correspond à une spire (ou autre combinaison due à la construction même et rapprochant les éléments) de longueur X , on a $\frac{\mu}{X}$ entre éléments voisins et $\frac{\mu}{X}$ par spire (ou la dite combinaison) :

$$M_1 X \frac{C}{A} - LC' = \frac{M_1}{N_1} C - LC',$$

N_1 étant le nombre de spires (ou de combinaisons du genre envi-

sagé) dans la longueur totale de l'enroulement. Quoique C soit $\gg C', \frac{M_1}{N_1}$ est considérablement plus petit que L qui se rapporte à l'enroulement entier ($L = l A$) et, en général, on peut négliger le terme en μ à moins (§ 20) que celui en l ne disparaisse ; de plus si, comme d'usage, pour la recherche approchée des fréquences d'oscillation, on néglige les résistances et conductances, on a :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} (1 - C' L \omega^2) = -v \frac{CL}{A^2} \omega^2$$

intégré par :

$$v = k e^{hx}$$

d'où :

$$u = \sum k e^{hx} e^{j\omega t}$$

» On tire de là :

$$h^2 = \frac{\frac{CL}{A^2} \omega^2}{C' L \omega^2 - 1}$$

» Avec $C' L \omega^2 \gg 1$, h est réel ; u est bien de la forme ci-dessus, c'est-à-dire le produit d'une exponentielle-distance par une fonction trigonométrique du temps. C'est la propagation analogue à la figure 19.

» Avec $C' L \omega^2 < 1$, h est imaginaire et u prend la forme :

$$e^{jh_1 x} e^{j\omega t}$$

c'est-à-dire le produit d'une fonction trigonométrique du temps par une fonction trigonométrique de la distance. C'est la propagation de la figure 14.

» La théorie élémentaire est ainsi vérifiée en ce qui concerne la fréquence critique et les deux modes de propagation de part et d'autre. En ne négligeant plus les termes en μ , r , g , on voit que des termes trigonométriques de la distance (d'importance secondaire) se conservent au-dessus de cette fréquence en s'atténuant quand elle croît.

» Dans le cas $C' L \omega^2 < 1$, les termes qui composent u sont de la forme :

$$k_1 \cos \theta x \cos \omega t.$$

» Si on porte cette valeur dans l'équation réduite :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{CL}{A^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - C' L \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t^2}$$

» Nous obtenons :

$$\omega = \frac{\theta A}{\sqrt{L(C + C' A^2 \theta^2)}}.$$

Dans le cas d'oscillation demi-onde, par exemple, $\theta A = \pi$, d'où :

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{L(C + \pi^2 C')}}.$$

et, en général :

$$f'_0 = \frac{1}{2\sqrt{L(C + \pi^2 p^2 C')}}.$$

justifiant ce que nous avons posé au paragraphe 3.

» Remarquons que, contrairement à d'autres qui ont été proposées, cette formule s'applique aux cas limites.

» S'il n'y a pas de capacité C' , $f'_0 = \frac{p}{2\sqrt{LC}}$, équation connue des lignes électriques.

» S'il n'y a pas de capacité C , on doit retomber sur la résonance d'un circuit composé simplement d'une self-induction et d'une capacité C' ; les liaisons entre éléments ne peuvent charger l'oscillation, puisque chaque groupe élémentaire a le même produit $l c'$ que l'ensemble (fig. 5 et 17) ; dans ce cas, la formule doit montrer la disparition des harmoniques, puisque, comme on le sait, cette oscillation n'en comporte pas. Notre formule donne bien :

$$f_0 \text{ et tous } f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

» 21° *Fréquences critiques.* — Si $LC'\omega^2 = 1$, ou $l \gamma \omega^2 = 1$ (fréquence critique), l'équation en $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ devient :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} [-j(\mu g - r\gamma)\omega + \mu c \omega^2] = v [rg + j(rc + lg)\omega - lc \omega^2].$$

» Si l'on fait r et g nuls, il reste :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -\frac{l}{\mu} v$$

qui, par intégration, donnera des termes exponentiels à exposants imaginaires, lesquels se transformeront en un terme trigonométrique de la forme $\cos \sqrt{\frac{l}{\mu}} x$.

» L'induction mutuelle a donc pour effet de conserver une certaine transmission sinusoïdale dans la distance aux environs de la fréquence critique, qui se superpose à ce qu'on trouve en négligeant cette influence de la différence des courants entre points rapprochés par le mode d'enroulement. Elle donne une transi-

tion entre les deux modes de fonctionnement ; ces termes disparaissent quand $l \gamma \omega^2$ devient beaucoup plus grand que 1.

» De plus, si, au lieu de

$$\gamma \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots$$

on introduit

$$\Sigma \gamma_i \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \dots$$

pour les spires, couches, bobines... qui arrivent à être voisines par le mode de construction, les termes en $l \gamma \omega^2$ ne seront pas tous nuls en même temps, et jamais $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ ne prendra la forme simple $-\frac{l}{\mu} v$ ci-dessus, qui donne à l'entrée de l'enroulement $\frac{\partial v}{\partial x} = \infty$ si l'on néglige μ .

» Tout cela concourt donc à réduire le danger de surtension à l'entrée pour la ou les fréquences critiques (fin du § 18), chacune d'elles plus ou moins bien marquée.

« J'espère, Messieurs, avoir contribué à montrer que le constructeur de transformateurs de grande puissance et haute tension possède des données sortant de l'empirisme, le mettant à même d'assurer la sécurité des installations des exploitants en livrant à ces derniers des appareils qui résisteront aux surtensions créées par les incidents normaux, et ayant le plus possible de chances de résister aux violents accidents.

» Je m'empresse d'ajouter, ce qui est évident d'ailleurs, que cela ne suffit pas pour faire de bons transformateurs. L'expérience montre qu'il ne faut pas attribuer, comme on a quelquefois tendance à le faire trop vite, aux surtensions et phénomènes assez difficiles à saisir, des accidents résultant de fautes du constructeur ou de l'exploitant.

» Je crois qu'à tous ces points de vue, les bons constructeurs français n'ignorent pas leur métier. Je viens précisément d'analyser en détail leurs productions, en les comparant à celles de leurs confrères, pour la rédaction du livre de l'Encyclopédie de M. Blondel à ce sujet. Ells ne le cèdent en rien aux appareils étrangers qui, comme on l'a vu récemment, ne sont pas à l'abri des accidents, et il serait juste de leur faire confiance, en les utilisant uniquement dans nos grandes transmissions. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Bunet.

LES PIEDS POUR POTEAUX EN BOIS

Les 3 types de supports de lignes aériennes couramment employés en France sont : le poteau en béton armé, coûteux mais indestructible ; le poteau ou pylône métallique, dont il faut périodiquement réassurer la protection contre les agents atmosphériques, et le poteau en bois, très économique comme premier établissement, mais qui très vite pourrit à la base et doit être remplacé.

Le poteau en bois maintenu régulièrement hors du sol et fixé à un pied indestructible est un quatrième type, très répandu à l'étranger, type qui pour l'édification de lignes neuves présente généralement de notables avantages et qui s'impose pour la réfection des anciennes lignes montées sur poteaux bois.

M. DE TRAZ. — « Le prix des supports des lignes électriques est un élément des plus intéressants à considérer par tous ceux que le développement des applications de l'électricité préoccupe. Pour ce qui est tout au moins des lignes secondaires, c'est, en effet, de lui que dépendra, en grande partie, la possibilité de conduire le courant partout dans les campagnes.

» Des formules nouvelles, notamment celles faisant intervenir les municipalités qui empruntent à bon compte et peuvent, dans un intérêt général, ne pas laisser peser entièrement leurs charges sur les consommateurs, permettent de réduire beaucoup la part des prix de ventes qui doit correspondre aux frais d'établissement des petits réseaux de distribution locale.

» Les fortes consommations des régions industrielles et des grands centres permettent, d'autre part, d'établir de puissantes centrales réunies par de grands réseaux auxquels l'énergie électrique peut être puisée à si bas prix que, malgré l'énorme perte à considérer, dans la transformation, pour les consommations faibles, le prix de revient du courant vendu, s'il n'y avait que cela à compter, serait encore fort réduit.

» Dans ces conditions, des tarifs qui ne seraient pas prohibitifs rémunéreraient suffisamment toutes les charges, y compris celles de l'exploitation, s'il ne restait à joindre les grands réseaux à mailles très larges aux innombrables distributions locales.

» Le coût des lignes très ramifiées nécessaires à cette jonction est le plus gros obstacle à ce qu'on puisse partout, raisonnablement, distribuer le courant.

» Or, si une ligne se compose essentiellement de fils ou câbles conducteurs, qui, d'ailleurs, ne s'usent pas, et conservent toujours, aux variations de cours près, la même valeur d'emploi, il inter-

vient aussi, dans le prix de son établissement et dans le coût de son entretien, avec les isolateurs et les ferrures, les supports qui la fixent au sol. Et si le prix des fils et câbles est déterminé par des considérations électriques ou mécaniques fort rigoureuses, il n'en est pas de même pour les supports, dont la variété de types utilisés suffirait à montrer qu'à leur égard aucune formule définitive ne s'est encore révélée.

» Après une revue rapide des caractères économiques des types de supports couramment employés en France, nous pensons démontrer aisément quels avantages considérables présente, du point de vue qui nous occupe, le type de supports, largement utilisé à l'étranger, constitué par des poteaux en bois montés sur pieds imputrescibles.

» Nous résumerons ensuite les conditions générales auxquelles la constitution de pareils supports doit satisfaire, et nous terminerons par la description d'un des modes d'application des principes exposés que nous connaissons particulièrement.

LES TYPES COURANTS DE SUPPORTS.

» Bien qu'il faille souvent, à cause des capitaux disponibles, considérer le seul prix d'établissement des lignes et, conséquemment, des supports, il est clair qu'il importe plus encore d'examiner l'ensemble des charges financières provenant tant de l'installation que de l'entretien. C'est de ces deux points de vue que nous comparerons les quatre types de supports presque seuls employés, à savoir le poteau en béton armé, le pylône métallique courant, le support métallique mince, qui depuis quelque temps est assez en faveur et, enfin, le poteau en bois tel qu'il est ordinairement utilisé.

Le premier est le seul qui, lorsqu'il a été construit et installé dans d'excellentes conditions, n'exige ensuite aucun frais d'entretien ou de remplacement ; les agents atmosphériques sont sans action sur lui et même il se solidifie en vieillissant ; il revêt, en conséquence, un caractère immobilier que certaines compagnies apprécient tout particulièrement. Son prix d'achat dépend des conditions dans lesquelles peuvent être obtenus l'acier, le ciment et le sable ; il n'est malheureusement abordable que lorsque les po-

teaux en béton armé peuvent être fabriqués près des lieux d'emploi, donc en assez grande quantité ; ce prix d'achat est alors peu différent de celui des pylônes métalliques, pourvu qu'il s'agisse de supports ayant à résister à des efforts au sommet de moyenne importance. Il faut y ajouter le prix, très élevé, de la distribution et du dressage de ces supports très pesants. Par contre, en bon terrain et pour des efforts au sommet peu considérables, on peut mettre le poteau en terre sans massif de base.

» Le pylône métallique, plus léger, facile à sectionner en plusieurs tronçons, est d'un transport et d'un dressage relativement peu coûteux. Pour les gros efforts au sommet, son prix d'achat est bien moindre que celui des poteaux en béton ; on peut, d'ailleurs, rendre ce prix d'achat relativement faible quand rien ne s'oppose à ce qu'on augmente l'encombrement à la base. Mais le pylône métallique formé de fers étroits ne serait pas, seul, maintenu par la poussée des terres et même, aux endroits où l'on pourrait compter sur cet élément, il faut faire à sa base un massif toujours coûteux, ne serait-ce qu'à cause des frais d'amenée des matériaux nécessaires. Enfin, et c'est le plus grave, le support métallique rouillerait vite si l'on ne refaisait pas soigneusement, à mesure qu'elle s'en va, la peinture qui le protège ; il en résulte de sérieux frais d'exploitation.

» Le support métallique mince a les mêmes caractères que le support précédemment examiné, avec cette double différence que, beaucoup plus léger, il est d'un achat moins coûteux, mais n'est utilisable que pour les lignes peu importantes.

» C'est le cas aussi du poteau en bois qui ne peut être employé pour les gros efforts au sommet avec de grandes hauteurs, car les prix des troncs d'arbres nécessaires deviendraient, en France du moins, prohibitifs. Son grave défaut est d'entraîner à des frais d'exploitation encore supérieurs, et de beaucoup, à ceux des supports métalliques, à cause de la nécessité de le remplacer au bout d'un nombre d'années relativement court. Dans nos régions, où les insectes ne l'attaquent guère, le bois abattu en bonne saison et placé à l'air libre résiste assez bien (les poutres protégées par la peinture durent des siècles). Les poteaux, défendus en leur partie supérieure tronquée contre l'infiltration de l'eau dans les fibres, et garantis par ceux des procédés spéciaux d'injection ou d'imprégnation qui sont réellement efficaces, pourraient, s'ils n'avaient

pas de contact avec le sol, durer aussi fort longtemps. Mais, à leur base, les poteaux en bois des lignes électriques pourrissent rapidement : l'humidité, la température assez constante du sous-sol, permettent à diverses espèces de champignons de ronger peu à peu le bois, ou de le transformer très profondément en une matière sans résistance que parfois l'examen de la surface ne décelé pas. On a essayé de bien des moyens de protection : le goudronnage, l'enveloppement dans du carton goudronné, etc..., rien n'empêche une destruction en un nombre d'années qui varie beaucoup avec le sol, mais qui est presque toujours inférieure à 10.

» Comment ces divers types de supports se placent-ils, en définitive, les uns par rapport aux autres, du point de vue économique où nous nous sommes placés ?

» Il est très malaisé de faire à cette question une réponse générale.

» La partie variable du coût, initial ou annuel, d'une ligne donnée, est, nous l'avons vu, le coût total de ses supports et de leur armement.

» Or, les cours dont les fluctuations sont inégales, les régions diverses où il faut, soit manipuler le sable, le ciment et l'acier nécessaires, avec l'eau, au béton armé, soit faire venir les poteaux ou pylônes en bois ou en fer, les conditions d'amenée à pied d'œuvre (distances, dénivellations, voies d'accès), les taux de main-d'œuvre, modifient complètement, dans chacune des quatre hypothèses, les prix de revient unitaires des supports armés et posés, destinés aux divers efforts en tête et, conséquemment, leur plus avantageuse répartition. Leur coût d'établissement total varie donc beaucoup, ainsi que l'annuité d'intérêt et d'amortissement correspondante, à laquelle il convient d'ajouter les frais de peinture pour les supports métalliques et les frais de remplacement pour les poteaux en bois.

» On conçoit que, dans ces conditions, une comparaison faite dans un cas déterminé, ne soit valable que pour lui.

» On peut, toutefois, se demander ce qu'il en serait dans des conditions moyennes ne favorisant pas spécialement tel ou tel genre de support.

» S'il n'y avait à considérer alors que des alignements droits, on pourrait dire que le moindre coût annuel sera celui des poteaux métalliques légers ou des poteaux en béton, et le plus élevé celui

des pylônes métalliques rectangulaires ou des poteaux bois, sans que la différence entre les extrêmes atteigne 20 pour 100, écart qu'on rencontre fréquemment entre les offres de divers entrepreneurs pour les mêmes travaux et qui est très dépassé par l'effet des causes de variation déjà citées.

» Mais il est un élément dont l'influence est beaucoup plus considérable que celle des conditions locales diverses tout à l'heure énumérées, c'est la sinuosité des tracés qui intervient tout particulièrement dans le cas des lignes secondaires.

» Dans les régions cultivées et, à fortiori, dans les régions où des agglomérations nombreuses doivent être contournées ou traversées avec des dispositions spéciales, la ligne en alignement sur une forte proportion de sa longueur est un mythe, et nous connaissons des lignes de la région parisienne n'ayant pas le quart de leurs supports en alignements.

» Or, si l'on arrive à un coût relativement faible des supports en béton ou métalliques, dont le prix unitaire ne peut jamais être très réduit, c'est en utilisant, pour en diminuer le nombre, la résistance mécanique élevée dont on peut les doter, sans majorer en proportion leur revient.

» Dans les comparaisons, pour alignements droits, entre le poteau en bois et le poteau en béton, on prend ainsi des portées variant presque du simple au double.

» Que quelque accident local, un léger angle, une traversée de route amène à réduire de moitié dans la seconde hypothèse la portée prévue, et il faudra prévoir en supplément un support presque aussi coûteux que les autres ; dans la première hypothèse, le prix de revient ne change pas, le nombre des supports restant le même.

» Il en est ainsi dans les parties sinueuses des lignes en bordure de route, où les portées doivent être extrêmement réduites.

» Pour toutes les lignes secondaires ne se présentant pas dans des conditions très exceptionnelles de rectitude de tracé, on peut assurer que cette considération fait passer la ligne sur poteaux bois très en avant des autres modes de support, quant à l'économie du coût annuel.

» Pour ce qui est du coût initial, la question est beaucoup plus simple : la ligne sur poteaux bois est alors, toujours, de beaucoup, la moins chère ; la ligne sur poteaux métalliques minces vient ensuite et, seule, la comparaison entre le poteau en béton et

le pylône métallique à sections rectangulaires est un cas d'espèces.

» Il semblerait résulter de ce qui précède que dans presque toutes les circonstances le poteau en bois devrait avoir la préférence, qu'à son défaut le poteau métallique mince ou le poteau en béton devraient être choisis, et que le pylône métallique rectangulaire devrait être complètement proscrit.

» Mais d'autres considérations entrent en jeu.

» En faveur des pylônes métalliques, on peut dire qu'il en faut toujours mettre en certains points, et que le prix de ces supports spéciaux serait moindre s'ils faisaient partie d'une commande importante de supports courants de même nature.

» En ce qui concerne le poteau en béton, nous avons vu qu'un de ses inconvénients réside dans la grande difficulté de l'amenée jusqu'à pied d'œuvre de ce support très pesant, difficulté qui, malgré les dispositions prises dans la construction même pour que le poteau résiste aux efforts spéciaux dûs au transport, provoque souvent des arrachements superficiels ou même des déformations internes susceptibles d'affaiblir et parfois de détruire complètement sa solidité et son caractère durable. Un autre désavantage du poteau en béton est la difficulté de se procurer et de placer les supports isolés appelés, après la période de construction, à remplacer ceux que des accidents fortuits démolissent ou qui, par suite d'avaries restées ignorées lors de leur montage, se détruisent d'eux-mêmes. Le poteau en béton a encore un inconvénient, c'est qu'on ne sait pas, à le voir, avec quelle conscience il a été exécuté. Son aspect extérieur peut être parfait, surtout s'il a été enduit d'un élégant enduit, mais ceci ne prouve pas que le béton a été non seulement dosé, mais surtout travaillé comme il convient qu'il le soit, ni encore moins si l'armature a été placée comme il faut et comporte des fers de sections suffisantes : l'importance de cette considération est fort accrue par la difficulté d'exécution, dans des conditions généralement assez peu pratiques, de pièces très longues et très lourdes.

» Le support métallique léger, s'il répond aux prescriptions administratives, ne semble pas devoir résister suffisamment à tous les efforts qu'il faut considérer, à moins de l'employer dans des conditions qui réduisent ses avantages.

» L'obligation de repeindre les supports métalliques, minces et

autres, a, d'ailleurs, le très gros inconvénient d'entraîner d'importants arrêts de l'exploitation, comme, d'ailleurs, l'obligation de changer les poteaux en bois.

» A ceux-ci, tels que nous les employons, correspond, en outre, un manque de sécurité de l'exploitation qui est fort grave. On ne sait jamais si tel poteau qui paraît sain, n'est pas à sa base miné intérieurement et ne rompra pas au prochain orage. Il est le moins sûr des supports, aussi, bien que les autres aient chacun, nous venons de le voir, leurs inconvénients, on s'accorde de plus en plus à le proscrire pour les lignes neuves.

• » A l'étranger, on en fait cependant un très large emploi. Simples, doublés ou réunis à plusieurs en véritables pylônes, ils supportent des lignes de tous genres, même des transmissions d'énergie de première importance, comme les artères principales des réseaux suédois et américains. Mais ces poteaux sont dotés du dispositif dont nous allons parler, qui change du tout au tout leur caractère ; ils constituent ainsi un quatrième genre bien distinct de supports.

LES POTEaux EN BOIS MONTÉS SUR PIEDS.

» Si le support est constitué, pour la majeure partie de sa hauteur, par un tronc d'arbre coupé dans la bonne saison, écorcé, garanti contre les infiltrations d'eau dans les fibres, au moyen d'un revêtement approprié du sommet, et protégé dans toute sa masse, ou tout au moins sur une épaisseur suffisante, par des injections ou une imprégnation sérieuse, si ce poteau, supporté lui-même, est maintenu au-dessus du niveau du sol, la pourriture de la base ne se produira pas et la durée sera, sinon celle des poutres apparentes des maisons du moyen-âge, qui subsistent encore, du moins celle assurément des concessions à l'expiration desquelles l'actuel exploitant ne possèdera plus ses lignes. Pour cet exploitant, le support ainsi constitué aura les mêmes qualités de durée sans entretien que le poteau en béton armé, à condition, bien entendu, qu'il en soit ainsi du pied ajouté au poteau en bois. Il assurera, sous réserve encore que le pied satisfasse aux conditions voulues, les facilités de montage que ni le poteau en béton armé ni le pylône métallique ne pourraient donner, tant pour la première pose que pour le remplacement, après les chocs fortuits ou après ces ouragans à l'abri absolu desquels ne peut être aucun

support. Il assurera la même sécurité d'exploitation. Il coûtera pourtant en annuités d'intérêts et d'amortissement augmentées des frais d'entretien, beaucoup moins cher, tout en étant, aussi, beaucoup moins coûteux comme premier établissement, pourvu que les caractéristiques du pied lui-même ne détruisent pas cette supériorité.

» Or, pour ce qui est du prix de ce pied, il n'y a aucune crainte à avoir que cette condition ne soit réalisée et le tort de plusieurs des ingénieurs qui ont, en France, cherché à mettre au point des pieds pour poteaux en bois a été et est encore d'en vouloir la réduction de prix à toute force.

» Il va de soi que, moins le pied sera coûteux, mieux cela vaudra, mais cet avantage est secondaire ; il faut d'abord que le pied remplisse, et pour longtemps, toutes les conditions voulues de résistance et d'emploi pratique, et il est facile de voir qu'alors le prix sera toujours assez bas pour que le poteau bois avec pied soit le plus avantageux des supports.

» En effet, prenons d'abord le seul des autres supports qui n'entraîne ni frais d'entretien, ni remplacements : le poteau entièrement en béton ; il coûte presque toujours plus de cinq fois le prix d'un poteau en bois, et bien plus encore si l'on prend le support posé ; il est vrai qu'il en remplace deux ou presque ; mais aucun pied de poteau ne coûtera deux ou trois fois le prix d'un poteau en bois. Prenons l'extrême opposé, le support constitué de poteaux en bois enterrés. On peut compter qu'en quarante ans on mettra trois fois au moins de nouveaux poteaux ; et il faut compter tous les frais et ennuis de ces remplacements ; on trouve une proportion analogue à celle de tout à l'heure.

» La ligne sur poteaux dotés de pieds coûte, évidemment, comme établissement, plus cher que la ligne sur poteaux enterrés ; mais elle reste meilleur marché que les lignes montées sur les autres types de supports précédemment examinés, et l'écart avec les poteaux en béton ou les pylônes métalliques à sections rectangulaires est considérable.

» Pour ce qui est du coût annuel, la supériorité de la ligne montée sur pieds est absolue ; l'économie par rapport au poteau bois enterré, est d'au moins 25 pour 100 (le remplacement des poteaux n'entrant plus en compte), si bien que, même dans le cas théorique

d'une ligne entièrement en alignement droit, l'avantage de l'exploitant, pour toute la durée de sa concession, existe ; il est énorme quand la sinuosité du tracé ajoute l'intérêt de pouvoir sans trop de frais multiplier les supports.

» Il semble qu'on puisse faire aux pieds qui, en principe, pourraient être exécutés en toutes matières, les mêmes objections qu'aux supports entièrement constitués comme le seraient ces pieds.

» C'est absolument le cas pour le bois et le fer. Pour le béton armé, toutes les objections basées sur la difficulté d'exécution, de distribution et de dressage de monolithes très longs et très pesants disparaissent. Il reste seulement la nécessité d'une consciencieuse construction.

» Il semble que nous ayons montré quels sont les avantages économiques et les avantages pratiques d'un système de supports dont nous pensons que l'emploi se généralisera en France comme ce fut le cas à l'étranger, du moins pour l'établissement des innombrables kilomètres de lignes appelées à réunir aux grandes artères les postes des distributions locales.

» Rien n'empêche évidemment de doter des avantages du système que nous préconisons des lignes déjà établies sur poteaux en bois enterrés. Il n'est pas nécessaire pour cela de changer leurs poteaux, qui, sauf pour la partie dans le sol, sont généralement à peu près aussi sains que s'ils n'avaient pas été mis en terre. Il suffit d'enlever cette partie et de la remplacer par un pied, et cela n'exige aucun arrêt de l'exploitation.

» Cette réalisation en deux étapes aura certainement été, au total, un peu plus coûteuse, puisque, lors du montage, on aura acheté un poteau trop long (de deux mètres environ) et que l'on aurait pu éviter d'avoir à revenir faire une seconde fois un trou.

» Il n'est donc pas à conseiller d'adopter d'avance un semblable programme aux entreprises de distribution qui, lors du montage d'une ligne, ont toutes les disponibilités nécessaires pour l'établir de suite dans les meilleures conditions.

» Mais bien souvent, il importe d'utiliser pour une distribution aussi étendue que possible, les premiers fonds recueillis à cet effet, alors qu'on peut envisager la couverture plus facile par la suite des compléments de frais d'établissement nécessaires. Il est certain qu'en pareils cas, l'adjonction après coup des pieds peut être, même à l'avance, jugée raisonnable pourvu qu'on ne doive

pas attendre pour y procéder plus des quelques années au delà desquelles, dans certains terrains surtout, la solidité des poteaux enterrés est fort compromise.

» Un grand nombre de lignes sur poteaux en bois enterrés existent en tous cas, qui ont été montées alors qu'on ignorait ou qu'on connaissait mal l'avantage des pieds de poteaux, du moins en France, où aucun système n'existait encore qui ait fait largement ses preuves. Sur toutes celles qui remontent à plus de quelques années, on a sans cesse à remplacer des poteaux qui sont tombés, entraînant parfois plusieurs portées dans leur chute, malgré les soins qu'on apporte à vérifier l'état apparent des supports et à changer, avant ces accidents, ceux qui menacent de se rompre.

» Il va de soi qu'il y a avantage, non seulement à ne pas attendre pour procéder à ces réfections, mais à profiter de ce qu'il faut en faire les frais pour transformer en même temps la ligne.

» Cette transformation, d'ailleurs, qui doit supprimer tout entretien ultérieur, en apportant la plus parfaite sécurité d'exploitation, se trouve être en elle-même plus avantageuse que le changement des poteaux enterrés. En effet, comme il n'est pas besoin de désarmer et réarmer les supports dont la partie supérieure est conservée, on pourra, si le système du pied adopté s'y prête, faire la transformation sans arrêt aucun du service. Outre les divers autres inconvénients des interruptions dans la fourniture du courant, on sait qu'elles coûtent assez cher, tant en manque à gagner qu'en frais inhérents aux allées et venues et temps perdu qu'elles entraînent.

» De plus, il en coûte aussi de désarmer et réarmer bien plus qu'il en coûte d'amarrer un poteau, préalablement scié à la base, sur un pied dont la fixation dans le sol et même la distribution aux lieux d'emploi sont moins onéreuses que le levage et le transport d'un poteau.

» Il faudrait donc que le pied fût très considérablement plus cher qu'un poteau de remplacement pour qu'il n'y ait économie à faire la transformation, sans même considérer ses avantages pour l'avenir, qui pourtant doivent l'être.

» Or, les pieds de poteaux, même ceux dont le prix n'est pas réduit au détriment de leur qualité, ne coûtent pas plus cher que les poteaux en bois.

» *Caractères généraux des pieds de poteaux.* — Cette question de qualité est pour les pieds de poteaux de première importance.

» Si la ligne la moins chère est portée par de simples poteaux en bois que maintiennent entièrement hors de terre des pieds solides, invulnérables à l'humidité du sol ainsi qu'aux agents atmosphériques, et d'un emploi pratique, la ligne la plus coûteuse est portée par des poteaux montés sur des pieds trop légers qui ne tiennent pas, quel que puisse être le bas prix de ces pieds.

» Il faut un pied qui tienne et qui soit pratique.

» Tenir, pour un support, c'est résister à l'action du vent sur les fils et sur lui-même, ainsi qu'à la tension non équilibrée aux angles ; c'est aussi résister au moins provisoirement aux efforts qu'exerce, malgré l'élasticité des supports, la tension unilatérale des fils rompus.

» Quant aux efforts verticaux, dus au poids de la ligne et du support, on sait qu'avec les poteaux en bois ils sont en général très faibles, au point qu'un poteau tout chargé, momentanément posé simplement sur un sol moyen n'y enfonce pas.

» Le support peut ne pas tenir de deux manières ; il peut s'incliner dans le sol, ou se rompre.

» Pour ce qui est du premier point, le pied qui, à cet égard, alourdit fort heureusement le support à sa base peut évidemment être établi pour que la résistance des terres s'oppose mieux à son déversément que pour le poteau enterré, dont le grave défaut est d'être rond ; dans les terres molles, on bétonnera le pied, de même qu'on bétonne le poteau enterré, avec cette différence qu'on obtiendra un massif du poids voulu avec moins de béton.

» Quant à la résistance à la rupture, la question paraît en somme assez simple : il faut résister à des moments fléchissants. Si on suppose le poteau solidement amarré au pied, on se trouve pour ce dernier en présence d'un problème très courant, et les dimensions des matériaux employés peuvent être, suivant leur nature, et les emplacements qu'on leur donne, mathématiquement déterminées ; le choix de ces matériaux, leurs dispositions judicieuses peuvent seuls réduire le prix de revient dont nous parlions tout à l'heure : on ne le réduirait autrement qu'en sacrifiant la résistance et c'est la dernière chose à faire.

» Toutefois, les conditions de résistance d'un pied court, sou-

mis à la répercussion d'efforts s'exerçant au bout du mât irrégulier de forme et flexible qui lui est fixé, ne sont pas absolument celles du poteau en béton armé ; comme pour ce dernier d'ailleurs, les bonnes conditions de résistance aux effets inégaux et giratoires du vent se déterminent plus par une longue expérience que par le calcul, cette expérience révélant la nécessité de dispositions qui théoriquement sembleraient superflues.

» Il importe que dans une ligne montée avec pieds, ceux-ci résistent toujours, même pendant les vents d'orage dépassant les prévisions réglementaires. Il suffit pour cela que le pied soit plus résistant que le poteau, dont la rupture le sauvera. C'est pourquoi nous conseillons dans le montage de lignes neuves, après avoir déterminé les poteaux nécessaires dans des cas déterminés tels que ceux en alignement droit, d'éliminer soigneusement en les réservant pour d'autres emplacements, les poteaux plus gros qu'il n'est utile, afin de n'avoir pas à prévoir pour ces mêmes cas l'emploi de pieds de résistance superflue. Cette question de résistance est de première importance, nous ne saurions trop le répéter, et l'économie ne doit être cherchée, dans les fournitures suffisamment importantes, que dans l'adoption de divers modèles de pieds répondant aux divers cas d'emploi.

» Après la considération de résistance mécanique dès l'instant du montage, vient celle de la durée des pieds. Il est certain que des pieds qui conserveraient pendant peu d'années seulement leur solidité ne présenteraient aucun intérêt et il pourrait sembler que l'idée de faire des pieds en bois n'aurait dû venir à personne. On en a cependant imaginé qui sont dotés, il est vrai, d'un dispositif spécial permettant d'en entretenir, par des injections périodiques pratiquées sur place, l'invulnérabilité. Nous ne connaissons aucune des applications qui ont pu être faites de cette invention et nous pensons que même si l'invulnérabilité est ainsi complètement maintenue, toute solution entraînant des frais d'entretien tire incomplètement partie des avantages attachés au principe même des pieds distincts des poteaux.

» C'est le cas pourtant aussi de systèmes assez nombreux de pieds qui sont constitués entièrement en métal oxydable ou dans la constitution desquels il entre des pièces métalliques fixes ; on est, en effet, obligé d'en assurer et d'en maintenir la protection contre les agents atmosphériques ; il nous semble que la partie

mise en terre du pied et tout ce qui fait corps avec elle doit être imputrescible, et ce n'est guère que le béton armé qui peut, avec la résistance voulue, assurer cette condition.

» Il en est une autre de même ordre qui s'impose. Un pied ne vaudrait rien qui n'éviterait pas la pourriture du poteau. Si la base de ce dernier est par le pied mise à l'abri de la gelée, comme de la dessiccation par les fortes chaleurs, les parasites l'attaqueront comme ils feraient si elle était enterrée, et l'économie du système sera totalement ou partiellement détruite.

» Le poteau doit donc être aussi dégagé que possible du pied.

» Nous croyons même qu'il est préférable d'éviter toute entaille et toute perforation du poteau. On sait en effet que les procédés d'immunisation sont, pour la plupart, d'une efficacité plus complète dans les couches superficielles du bois, qui elles-mêmes contribuent à protéger le cœur.

» Indépendamment des trois conditions que nous venons de passer en revue : solidité, durée, conservation du poteau, les pieds doivent être d'un emploi pratique.

» Il faut que des manœuvres puissent les monter rapidement et, même si leur utilisation n'était prévue que pour des lignes neuves, il faudrait qu'ils se prêtent ultérieurement à un changement facile des poteaux.

» A cet égard, le mode de fixation du poteau au pied joue un grand rôle. Il a donné lieu à des essais divers. Certains tendaient à rendre cette fixation en quelque sorte automatique par encastrement du poteau dans le pied, établi, à cet effet, en forme de tube ; malgré l'inégalité des efforts à considérer dans les divers plans verticaux, cette disposition se prête à un emploi assez rationnel de la matière employée quand celle-ci est du métal, mais elle a trois graves inconvénients : 1° l'encastrement est assez difficile à réaliser parfaitement à cause de l'irrégularité de forme du poteau, sauf au prix d'un équarrissage coûteux et nuisible ; 2° à moins que de très larges ouvertures ne viennent nuire à la solidité du tube, ou en augmenter le prix, la partie enclose du poteau est toujours à l'abri des variations de température et sèche mal après les pluies, surtout si la poussière et les feuilles mortes viennent remplir le récipient formé par le pied tubulaire ; 3° on

ne peut monter les poteaux dans le pied qu'en les présentant d'abord en prolongement l'un de l'autre, ce qui est mal commode, et ce qui, pour les remplacements de poteaux déjà posés, oblige à démonter la ligne.

» Cette dernière raison, principalement, a fait renoncer presque tous les inventeurs à la recherche de l'encastrement automatique et les systèmes récents prévoient la fixation au moyen d'attaches ou colliers destinés soit à relier entre elles les parties séparées de pieds en plusieurs pièces qui enserrant les poteaux, soit à appliquer directement les poteaux contre les pieds.

» Plusieurs d'entre eux obligent à façonner la base du poteau, ce qui, outre le coût de cette opération, a l'inconvénient déjà signalé d'entamer la surface du bois et d'ouvrir, ainsi, un chemin plus facile à la pourriture. Il en est qui comportent, en place ou en sus des colliers, la fixation par boulons, passant à travers le poteau qui, sauf pour des montages provisoires, ont aussi l'inconvénient d'abîmer le bois et n'assurent pas à la fixation une rigidité durable.

» Dans tous les pays, nous croyons que les premiers pieds de poteaux ont été constitués soit par des tubes en fonte ayant les inconvénients que nous avons vus tout à l'heure, soit par deux ferrures se plaçant dans le sens du principal effort, de chaque côté du poteau, et sortant d'une base en béton seule encastree dans le sol. Il fallait nécessairement repeindre périodiquement ces ferrures qui, lorsqu'elles se détruisaient, obligeaient à changer tout le pied. Il se fait encore cependant des pieds de ce genre.

» En Suisse, où les pieds de poteaux, dont nous venons d'indiquer les caractéristiques générales, sont très largement employés, les pieds métalliques qui étaient en service sont peu à peu remplacés par les pieds modernes, entièrement en béton armé, contre lesquels les poteaux sont fixés par colliers métalliques amovibles, galvanisés.

LE PALIX.

» C'est en Suisse que fut inventé le pied que nous présentons en France, sous le nom de « Palix ». Il y a fait ses preuves depuis un certain nombre d'années ; il est adopté par l'Administration des Postes et Télégraphes ; les chemins de fer fédéraux

en ont notamment muni les sections Brigue-Sion et Bourgdorf-Thoune déjà électrifiées; de nombreuses sociétés de distribution et entreprises industrielles en font un emploi courant.

» Le « Palix » est essentiellement constitué par un parallépipède rectangle, dont un peu plus de la moitié de la longueur est enfoncée dans le sol ; la base du poteau est solidement amarrée contre la partie externe, à une hauteur suffisante pour qu'elle ne touche pas la terre.

» C'est donc un montage dyssymétrique ; il serait peut-être illogique de fixer par côté un mât à ce qui doit le tenir, si ce mât avait à porter un poids important ; nous savons que dans le cas qui nous occupe, la charge verticale n'est pas celle qui compte et de cette dyssymétrie découlent ici les avantages du système. D'une part, en effet, la situation extérieure du poteau a permis de constituer la section du pied pour sa meilleure résistance aux moments fléchissants dans les divers plans verticaux, ainsi qu'aux effets de torsion; d'autre part, cette même disposition permet l'assemblage par simple déplacement latéral d'un des deux éléments à unir, ce qui assure toutes les facilités de manœuvre.

» En fait, les patientes études qui ont abouti à la détermination d'une armature assez complexe répondant à tous les desiderata (fig. 1) ont permis, hors de la zone d'encastrement, d'éviter les deux grandes faces du rectangle, qui prend ainsi, sauf au niveau du sol, la section représentée par la figure 3, et même de larges ouvertures ont pu être aménagées, tant dans la partie enterrée que dans la partie hors du sol, à travers l'âme même du pied.

» Celui-ci se présente alors comme le montre la figure 2 ; le poteau, accolé au pied, s'insère cependant quelque peu dans l'alvéole ménagée à cet effet, ce qui a l'avantage de faciliter une fixation solide.

» Le profil de chaque alvéole comporte trois faces planes, dont une parallèle au plus grand axe de la section du pied (lequel est généralement placé perpendiculairement à la ligne) et les deux autres s'évasant pour rejoindre les bords. Les dimensions pour chaque type sont telles que, seul, le plus petit en diamètre des poteaux qui puissent être employés touche au pied suivant trois génératrices. En pratique, les poteaux sont donc en contact seulement avec les deux faces divergentes, et un serrage contre le

pied doit, en raison de la nature du bois, assurer ainsi une liaison parfaite.

» Sur la face opposée à celle à laquelle est accolé le poteau, il y a également une alvéole : sa suppression ne ferait qu'augmenter inutilement le poids, et même pour l'emploi de poteaux simples, cette disposition est des plus utiles. Le profil de la se-



Fig. 1. — Carcasse d'un pied
« Palix ».



Fig. 2. — Poteau accolé à
un pied « Palix ».

conde alvéole est, en effet, un peu différent de celui de la première; cela permet, en choisissant le côté, d'employer des poteaux présentant entre eux d'assez grands écarts de diamètre, sans qu'ils cessent d'être convenablement serrés.

» De plus, pour remplacer un poteau, on monte le nouveau dans l'alvéole libre, on déplace l'armement, et on enlève ensuite l'ancien poteau.

» Enfin, on conçoit l'avantage d'une telle disposition pour le cas des poteaux jumelés, qui n'exigent qu'un pied.

» Les évidements de l'âme ont, dans la partie extérieure, l'intérêt de compléter encore l'aération du poteau, et dans la partie enterrée l'avantage considérable de permettre un excellent calage dans le sol. Ces évidements facilitent aussi beaucoup le transport.

» Le poteau peut être serré contre le pied de diverses manières : on peut employer deux grands boulons qui, dans le cas de po-

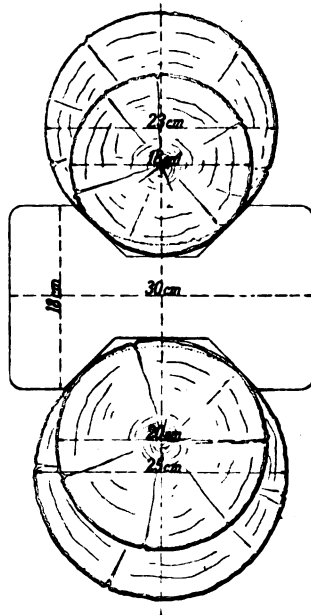


Fig. 3. — Section d'un pied « Palix » montrant les différents diamètres des poteaux en bois utilisables.

teaux jumelés, traversent les deux poteaux, ainsi que les trous ménagés dans le pied et qui, pour un poteau simple, le traversent ainsi qu'une plaque métallique placée de l'autre côté du pied. Cette disposition est, d'ailleurs, peu employée avec des poteaux simples, du moins pour les lignes neuves ; on peut la pratiquer sans inconvénients avec les poteaux jumelés lorsque ceux-ci doivent être assemblés à leur partie supérieure par boulons (ce qui ne vaut d'ailleurs pas un entretoisement à colliers).

» Le mode de fixation habituel comporte l'emploi de deux brides en tôle galvanisée fermées chacune devant le poteau au

moyen d'un boulon serrant l'un vers l'autre les deux éléments terminaux, coudés, de la bride.

» L'armature est formée de barres d'acier rond ligaturées réparties en trois systèmes distincts : quatre barres verticales placées aux quatre angles, quatre barres de forme spéciale en partie verticales, en partie obliques, qui à l'encastrement sont proches des deux petites faces du rectangle que forme la section du « Palix », enfin un grand nombre d'entretoises horizontales de diverses formes.

» Pour le calcul de résistance tel qu'il est généralement établi, les barres verticales entrent seules en jeu.

» Pour la section d'encastrement, qui est celle où la fatigue est maximum, l'armature longitudinale est constituée par huit barres symétriquement disposées de part et d'autre d'un plan vertical qui est le plan moyen de la ligne. Le calcul est celui d'une pièce encastree à une extrémité et travaillant à la flexion. Le cas d'emploi le plus favorable du « Palix » est celui pour lequel l'effort s'exerce parallèlement à sa plus grande dimension, quoique la flexion se complique alors d'une légère torsion provenant du fait que l'axe du poteau ne coïncide pas avec celui du « Palix » : Pour en tenir compte, le résultat d'une longue série d'essais a permis de déterminer qu'il suffisait de réduire dans les calculs la résistance à la rupture du métal de $1/5$.

» La teneur du béton employé est de 400 kg de ciment Portland artificiel, premier choix, à prise lente, pour 400 litres de sable de rivière et 800 litres de gravillon.

» Nous donnons ci-dessous la marche générale du calcul.

» Conformément aux prescriptions de la circulaire ministérielle du 20 octobre 1906, nous admettons que la résistance à l'écrasement de ce béton est de 200 kg/cm^2 . Dans ces conditions et étant donnée la disposition de l'armature transversale, le rapport m entre le module d'élasticité du métal et celui du béton, sera de 15.

» Dans les calculs qui suivent, il n'est pas tenu compte de la résistance du béton à la traction.

» 1° *Détermination de l'axe neutre X Y.* — Pour le déterminer, nous chercherons sa distance à la fibre de béton la plus comprimée ; nous écrirons à cet effet que la somme des moments

statiques, par rapport à cet axe, des différentes surfaces, béton comprimé, acier comprimé et étiré, est nulle, les sections d'acier étant multipliées par le rapport m .

» En désignant par s , la section totale d'acier sur chaque face; par d , la distance de l'axe des barres comprimées à l'arête la plus comprimée ; par h , la distance à la même arête de l'axe des aciers étirés; par b , la largeur de la section, et y , la distance de la fibre la plus comprimée à l'axe X Y, nous aurons :

$$\frac{b y^3}{2} + 2 m S y - m S (d + h) = 0, \text{ d'où } y.$$

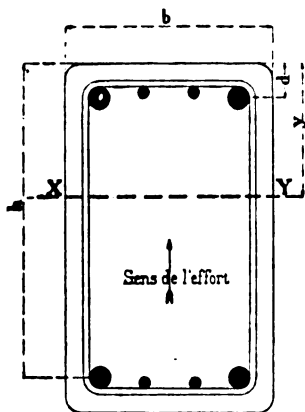


Fig. 4. — Détermination de l'axe neutre.

» 2° *Évaluation du moment d'inertie de la section.* — Le moment d'inertie composé, acier et béton, de la section, sera la somme des moments d'inertie élémentaires par rapport à l'axe neutre X Y ; dans ces conditions, on a :

$$I = \frac{b}{3} y^3 + m s ((y - d)^2 + (h - y)^2).$$

» 3° *Moment fléchissant maximum M que peut supporter la section d'encastrement.* — L'équation d'équarissage donne pour un taux de travail unitaire maximum du béton R_b :

$$M = \frac{R_b x y}{I}.$$

» 4° *Travail de l'acier.* — En nous tenant dans le cas de la déformation plane par flexion, nous pouvons admettre que le tra-

vail des montants est proportionnel à leur distance à l'axe neutre.

» Il en résulte qu'en multipliant R_b par m , la fatigue de l'acier à la compression sera donnée par :

$$R_c = m R_b \frac{y-d}{y}$$

et à l'extension par :

$$R_e = m R_b \frac{h-y}{y}.$$

» D'après ce dernier taux supérieur à R_c , nous déterminons le coefficient de sécurité de l'ensemble.

» Le « Palix » est entièrement exécuté en France.

» Dans des moules appropriés se placent les armatures préalablement façonnées, et le coulage s'opère dans des conditions assez spéciales, que nécessitent et permettent les dispositions particulières d'une pièce en béton armé assez différente de celles couramment exécutées. Les éléments des brides sont forgés et galvanisés.

» Le transport du « Palix », tout au moins par voie ferrée, réduisant assez sensiblement les avantages économiques de son emploi, toutes dispositions sont d'ores et déjà prises pour qu'en outre de son établissement complet dans des ateliers spécialement outillés à ces fins, il puisse être coulé dans des chantiers volants installés sommairement auprès des lieux d'emploi, sous la conduite d'un contremaître rompu à cette fabrication spéciale, les fers prêts à être assemblés et toutes autres fournitures nécessaires lui étant expédiés à peu de frais.

» Dans ces conditions, et pour les quantités qu'il y a lieu de considérer en pratique, les prix de vente du « Palix » dans toute la France seront assez voisins les uns des autres et partout ils seront très inférieurs à ceux à partir duquel l'emploi du pied pour poteau en bois permet d'établir la ligne la plus économique.

» En théorie, il peut être établi un type de « Palix » dont les dimensions principales et les armatures correspondent à tout moment fléchissant donné, et dont les alvéoles se prêtent à l'insertion de poteaux de diamètres moyens à la base déterminés (avec d'ailleurs une large marge en plus et en moins).

» Mais il est bien évident que la fabrication de types spéciaux à tous les moments fléchissants calculés conduirait à une grande

multiplication des éléments d'armatures et des moules à approvisionner, ainsi qu'à une complication dans l'utilisation même du « Palix ».

» En pratique, même pour une commande très importante justifiant une fabrication complète spéciale, on aura tout avantage à créer un type pour les supports courants et deux ou trois types pour les supports spéciaux : poteaux simples, surélevés ou en angles et poteaux jumelés.

» L'avantage de toutes fabrications en série a même entraîné à créer d'avance un certain nombre de types encadrant tous les cas d'emploi. A l'heure actuelle, il a été établi en France, pour les lignes de distribution d'énergie, quatre types désignés par les lettres B, P, T, V. Les trois premiers sont employés en alignement droit : le type B pour les lignes à faibles sections de fil, le type P pour la majorité des cas courants et le type T pour les lignes à très fortes sections. En courbes, on peut très souvent employer avec les poteaux simples le même type qu'en alignement droit pour les petites angles, et le type au-dessus pour les autres; avec les poteaux jumelés, on emploie, suivant les cas, le type T ou le type V.

» Les sections horizontales de ces divers types de « Palix » sont les suivantes, en centimètres :

	<i>Type B</i>	<i>Type P</i>	<i>Type T</i>	<i>Type V</i>
» Section horizontale :	16×28	18×30	22×35	26×38

» Leur hauteur hors sol est uniformément de 0,90 m, la partie enterrée atteignant 1,10 m à 1,30 m.

» Le montage du « Palix » est des plus simples. Pour les lignes neuves, la méthode la plus avantageuse consiste, ayant amené à pied d'œuvre le poteau et le « Palix », à les assembler et à lever ensuite en même temps l'ensemble dont le poids à la base facilite la manœuvre.

» Pour les lignes existantes, les opérations à effectuer sont les suivantes :

» Creusement, du côté le plus favorable, d'un trou dégagant seulement à demi le poteau sur une profondeur de 1,30 m environ ;

» Sciage du poteau à la distance voulue du sol pour qu'en re-

plaçant par la suite le poteau sur le pied, on régularise, s'il y a lieu, la hauteur de la ligne ;

» Ripage du poteau de façon à lui faire simplement échapper la base sciée, à l'opposé du trou. Cette manœuvre peut être faite, suivant les cas, à la main, ou au moyen soit de simples cordes, soit de fourches ou de grimpettes renversées, mises au bout de cordages. En alignement droit, et s'il n'y a pas de vent, le poteau, posé sur le sol et maintenu par la ligne, peut être laissé ainsi ; en angles, ou pour les lignes très chargées, il convient naturellement de l'immobiliser par des fourches piquées en terre ou au moyen de haubans provisoires ; en pareils cas aussi, on peut préférer creuser le trou seulement après le sciage et ripage du poteau ;

» Arrachement de la base du poteau ;

» Mise en place du « Palix » ;

» Ramenée du poteau à sa place initiale, c'est-à-dire dans l'évidement du pied destiné à le recevoir ;

» Pose des deux brides ; serrage ;

» Fermeture du trou (un premier bourrage calant suffisamment le « Palix » doit être fait avant la remise en place du poteau dans les angles ou en cas de vent, sauf si en déplaçant le poteau on maintient la fixation latérale provisoirement établie).

» On voit que ces opérations, bien que leur exposé soit nécessairement assez long, exigent au total fort peu de main-d'œuvre et sont tout à fait analogues à celles pratiquées couramment dans le montage ordinaire des supports. Elles peuvent être effectuées par des manœuvres, pourvu qu'on bon monteur de lignes les conduise. Sa compétence est d'autant plus nécessaire qu'il est tout à fait indiqué de profiter de la transformation des supports pour remédier par de petites modifications dans la hauteur ou par des déplacements en plan aux imperfections qui ont pu se produire lors du premier montage de la ligne.

CONCLUSION.

» Nous nous sommes quelque peu étendus sur le « Palix » parce que c'est celui des pieds de poteaux que nous connaissons tout particulièrement, ayant récemment décidé d'exploiter cette invention en France après de longues études comparatives des

systèmes existants. Mais nous avons voulu surtout insister sur les avantages généraux des pieds pour poteaux en bois.

» Nous sommes persuadés qu'on aura le plus souvent intérêt, pour l'édification des lignes neuves, même présentant de longues sections en alignement droit, à adopter ce genre de supports.

» Pour les lignes secondaires tortueuses, la question ne nous paraît même pas pouvoir se poser : monter sur poteaux ciment des lignes le long de routes sinuées est une erreur certaine maintenant que le pied de poteau existe.

» Quant à la régénération des lignes existantes, on ne voit pas quelles raisons pourraient être invoquées pour ne pas y procéder en les dotant de pieds plutôt qu'en remplaçant les poteaux, puisque cela les consolide pour plus longtemps, coûte moins cher et n'entraîne point d'arrêt de l'exploitation. »

REMARQUES SUR LA COMMUNICATION DE M. DE TRAZ

M. Paul LECLER. — « Il est souvent utile de protéger les poteaux en bois contre l'attaque rapide dont ils sont trop souvent l'objet au niveau du sol, et cela, sans avoir besoin de les recéper, ni de démonter les lignes qu'ils supportent.

» La durée de ces poteaux est, en effet, très variable, sur une même ligne. Suivant les conditions locales, certains poteaux vont durer 15 ans et plus, tandis que les poteaux voisins seront hors de service en quelques années. On ne peut absolument rien prévoir à ce sujet, et tout ce qu'on peut faire, c'est surveiller la ligne, de manière à soigner à temps les poteaux malades.

» Si l'on peut y arriver, surtout si on peut le faire sans avoir besoin d'employer un personnel spécialisé, rien qu'avec le personnel d'entretien ordinaire, on se trouvera placé dans des conditions d'entretien ordinaire, on se trouvera placé dans des conditions très favorables au point de vue économique, puisqu'on pourra avoir une ligne peu coûteuse de premier établissement, et dont cependant la durée sera assurée avec de faibles dépenses.

» Ce problème m'avait préoccupé dès avant la guerre, et j'avais envisagé, pour le réaliser, l'emploi de gaines en ciment armé, confectionnée sur les poteaux en bois eux-mêmes, avec des armatures faites d'éléments préparés d'avance, faciles à mettre en place par le premier venu, la faible quantité de ciment nécessaire étant gâchée à pied d'œuvre et coulée sur l'armature prise dans un coffrage léger en tôle; l'outillage très simple et facile à transporter était établi de manière que l'opération put être faite rapidement par un personnel non spécialisé, équipe d'entretien ordinaire ou manœuvres, suivant le cas. L'armature était telle qu'elle se centrât automatiquement dans le coffrage, sans aucune intervention des opérateurs, de sorte qu'elle était partout recouverte d'une couche suffisante de ciment, et que tout ragréage devenait superflu.

» J'ai indiqué pour la première fois ces idées dans une communication présentée au Congrès d'Electricité de Turin, en 1911, sur « quelques applications électrotechniques du ciment armé », et je les ai appliquées peu de temps après (1912 et 1913) à la Compagnie du Chemin de fer d'Orléans, aux poteaux doubles d'une ligne très chargée (2 000 mm²) allant de Tours à Saint-Pierredes-Corps (plus de 200 poteaux).

» Cette ligne, établie en mauvais terrains, donnait des signes de faiblesse et, devant les inconvénients et les difficultés de toute

nature que présentait le remplacement des poteaux, on voulait essayer si une solution économique ne permettrait pas d'en prolonger sensiblement la durée.

» C'est ainsi qu'on appliqua le dispositif que j'avais indiqué à Turin.

» Je n'en donne pas les détails; on les trouvera dans une communication que j'ai faite à la Société des Ingénieurs civils en 1913 (Nouveaux dispositifs de protection et de renforcement des poteaux de lignes électriques). Il m'en reste quelques exemplaires que j'offre bien volontiers à ceux que la question intéresse.

» De prime abord, cette idée de faire une gaine en ciment sur le poteau lui-même peut inspirer des doutes, mais les faits sont là : j'ai encore revu ces poteaux l'an dernier : l'ensemble s'était bien comporté et il n'y avait aucune trace de décollement entre les poteaux et le ciment. Était-ce dû à une contraction du ciment, ou à un gonflement des poteaux après mise en place des gaines ? Je ne prétends pas l'expliquer ; je me borne à signaler le fait, sans plus. La seule précaution prise avait été, quelques jours après la confection des gaines, de passer une couche de coaltar au pinceau sur la partie supérieure des bases en contact avec les poteaux (et aussi un peu sur la partie des poteaux émergeant des bases).

» La hauteur totale des gaines, lorsqu'il s'agissait seulement de protection, était de 0,80 m environ ; si l'on avait affaire à des poteaux trop attaqués et qu'il fallait renforcer, la hauteur devait être augmentée et atteignait 2,40 m.

» La confection de ces gaines de renforcement se faisait sans aucune difficulté: j'avais fait des moules en trois parties de 0,80 m de hauteur environ chacune ; on mettait colle du bas en place, et on y coulait le ciment ; on posait ensuite la seconde, qu'on remplissait à son tour. Avec du ciment à prise lente, on avait fini le remplissage bien avant que la prise n'eut commencé. On aurait pu évidemment monter les trois moules d'abord et couler d'un seul coup, mais l'expérience montre que, avec un personnel peu expérimenté, on ne peut pas être sûr que des moules d'une certaine hauteur, ne laissant qu'un faible passage pour le ciment, comme c'était le cas, seront convenablement garnis. Il faudrait alors procéder à des ragréages après démoulage, d'où nécessité de spécialistes, ce qui ferait disparaître tout l'intérêt du procédé, lequel n'est intéressant que s'il peut être utilisé par un personnel quelconque. Cette nécessité oblige, de plus, à faire des pièces d'ar-

mature parfaitement régulières, mais cela n'est pas un inconvénient, puisque ces pièces sont faites d'avance (j'ai dû, au reste, établir tout un outillage spécial pour cela).

» Les poteaux mixtes (base en ciment armé portant un fût en bois ou en métal) offrent un grand intérêt, qui n'est peut-être pas assez connu : la partie supérieure, supportant des efforts relativement faibles, peut être de dimensions transversales réduites, et, par suite, de faible poids, tandis que, comparativement à des poteaux entièrement en ciment armé, le fait que la longueur totale de la partie en ciment est réduite de toute la hauteur correspondant au fût en bois ou en métal constitue un avantage considérable à tous les points de vue (poids, prix, facilité de manutention, risques de rupture, etc.).

» Une différence de trois ou quatre mètres sur la longueur d'une pièce en ciment armé a, en effet, une influence très grande sur son prix, et sur les difficultés de fabrication, surtout de transport et de manutention.

» Cette solution comporte cependant une difficulté, dans la liaison du fût à la base en ciment armé. La liaison peut s'opérer d'une des manières prévues pour la fixation des poteaux sur des bases en ciment armé.

» Toutefois, le dispositif dans lequel la base porte à sa partie supérieure une douille dans laquelle vient se placer le fût semble intéressant surtout pour des fûts métalliques. Avec des fûts en bois, en effet, l'irrégularité des dimensions oblige à laisser un intervalle assez considérable entre la douille (qui peut d'ailleurs être un bout de tube pris dans le ciment, aussi bien que l'extrémité de la pièce en ciment elle-même). Il en résulte que les poussières et l'humidité peuvent se loger entre le poteau et la douille, ce qui n'est pas sans inconvénient au point de vue de la durée du bois.

» Avec des fûts métalliques, dont les dimensions sont plus régulières et plus précises, la question se pose différemment et l'assemblage est plus facile. Cependant, il semble qu'il faille éviter les calages avec des coins, tels par exemple que ceux employés pour réunir les tronçons de poteaux entièrement métalliques, formés de plusieurs éléments de différents diamètres : le ciment armé étant pratiquement incapable de supporter aucune déformation sans rupture, il suffit d'enfoncer un peu trop les coins pour

que le ciment se fende et devienne hors de service, sans qu'on soit prévenu. On peut éviter cet inconvénient en employant, comme je l'ai fait, des cales déformables qui s'écrasent lorsque l'effort qu'elles supportent devient trop considérable, et cela, avant que la limite de résistance de la partie en ciment n'ait été atteinte.

» Mais l'emploi de dispositifs de ce genre est parfois délicat, et il semble bien qu'on puisse s'en dispenser avec des fûts métalliques et des bases établies avec précision, comme il est possible de le faire avec des armatures et des moules convenables.

» On arrive ainsi à faire des pièces qui s'emboîtent les unes dans les autres, sans dispositifs de calage, ou avec des cales de très petites dimensions, par exemple de bouts de feuillard, le joint pouvant être garni finalement d'un peu de lait de ciment.

» On peut ainsi constituer des ensembles qui, sans être extrêmement décoratifs, sont tout de même moins frustes d'apparence que des poteaux en bois ou même entièrement métalliques. De plus, la base en ciment offrant une surface latérale plus grande que des poteaux métalliques tubulaires, l'assiette des poteaux mixtes dans le sol est bien meilleure, et on peut se dispenser des bétonnages qui augmentent parfois singulièrement le prix des lignes.

» Particulièrement lorsqu'il s'agit de supports de faible hauteur et peu chargés (par exemple, de supports de lampes dans des distributions urbaines relativement peu importantes), on peut établir ainsi, à des prix très abordables, des supports d'un aspect beaucoup plus satisfaisant que les supports ordinaires, sans les dépenses qu'entraîneraient des supports en fonte.

» Ainsi, j'ai pu réaliser, pour des poteaux en tubes de 60 mm de diamètre, des bases en ciment cylindriques à leur partie inférieure, tronconiques en haut, avec cordon à la partie supérieure, autour de l'emboîtement du tube, renflement de 20 cm de diamètre à la base, au niveau du sol, d'une hauteur total de 2 m, pesant moins de 80 kg (avec évidemment intérieur), obtenues par coulée, sans ragréage, simplement passées au chiffon humide à la sortie du moule. L'armature n'apparaissait en aucun point, malgré la faible épaisseur du ciment, grâce à sa régularité et à la présence d'attaches spéciales qui assuraient l'invariabilité de sa position dans le moule.

» De telles bases ne sauraient, évidemment, remplacer les bases en fonte dans toutes les circonstances. Néanmoins, il y a là

une solution qui paraît devoir être intéressante dans nombre de cas.

» D'ailleurs, d'une manière générale, il semble bien que les électriciens, et particulièrement les entreprises de distribution, auraient grand intérêt à envisager, beaucoup plus largement qu'avant la guerre, l'emploi du ciment armé.

» Avec des armatures bien faites, comportant des éléments préparés d'avance à des dimensions précises, et disposées de manière à se placer automatiquement dans les moules, sans que les ouvriers aient à s'en préoccuper, on arrive, en effet, à obtenir, sans difficulté ni emploi de personnel spécial, des pièces très susceptibles de remplacer la fonte ou le bois dans nombre de circonstances, avec une notable économie, ce qui ne semble pas à dédaigner actuellement.

» Il n'est donc pas inutile d'attirer leur attention sur ces questions.

M. le PRÉSIDENT remercie MM. de Traz et Lecler.

La séance est levée à 22 heures 45.

IL Y A TRENTE ANS

Essai de théorie chimique sur les accumulateurs au plomb (M. G. Darrieus).
— Expériences avec les courants alternatifs de haute fréquence et de haute tension (suite) (M. Tesla).

Le Gerant : J. GUYOT.

Impr. MOULIN, 20, rue de la Harpe, 2. 100. 100.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 7 juin 1922 : Admission de membres titulaires, p. 289. — Membres décédés, p. 290. — Ampères électrodynamiques à shunts (M. LOUIS JOLY), p. 291. — Les théories électriques de la matière (M. MARCEL BRILLOUIN), p. 303. — Remarques sur la communication de M. Brillouin (M. ALFRED LARTIGUE), p. 327.
IL Y A TRENTE ANS, p. 336.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 7 juin 1922. ⁽¹⁾

Présidence de M. Marcel BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 35.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes:

MM.

Garnier (Paul-Frédéric), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 35, rue Lhomond, à Paris (5^e). — Présenté par MM. P. Janet et G.-F. Guilbert.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Labbé (Edmond), Directeur de l'Enseignement technique, 49, rue Falguière, à Paris (15^e). — Présenté par MM. H. Chaumat et Labour.

Ravoux (Félix-Jean-Baptiste), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 3, rue de l'Estrapade, à Paris (5^e). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Tucoulat (Pierre-Amédée-Léon), Elève à l'Ecole supérieure d'Electricité, 21, Grande-Rue, à Bellevue (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. A. Pacault, G. Gourgenchon. Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

AMPÈREMÈTRE ÉLECTRODYNAMIQUE A SHUNTS J. CARPENTIER

Boîte de contrôle électrodynamique et électrodynamomètre universel à shunts

On sait que les ampèremètres électrodynamiques sont établis jusqu'ici en disposant, en série avec le circuit de champ, parcouru par le courant principal, un shunt sur lequel est branché en dérivation le cadre mobile de l'appareil. Dans le schéma proposé, le circuit de champ est monté en dérivation sur le même shunt que le cadre mobile et tous les deux ont en série une résistance de manganin destinée à abaisser le coefficient de température et la constante de temps du circuit dérivé.

Le shuntage d'une partie du circuit du cadre mobile par une résistance de nickel permet, d'ailleurs, de compenser pratiquement l'influence de la température. L'avantage d'un tel appareil est de changer de sensibilité par simple changement de shunt. En outre, une simple commutation permet de l'appliquer à la mesure des watts, de sorte qu'on peut réaliser soit une boîte de contrôle électrodynamique à deux appareils mesurant les volts et les ampères ou les watts, soit un électrodynamomètre universel à shunts mesurant successivement volts, ampères et watts.

M. L. JOLY. — « La réalisation de la multiplicité des sensibilités ampères dans les appareils de mesure pour courant continu et alternatif, en particulier dans les électrodynamomètres et dans les électromagnétiques, a été étudiée et mise au point depuis quelques années par les Ateliers Carpentier, et j'ai déjà eu l'occasion de vous présenter en 1912 et 1921 différents modèles d'appareils qui, depuis, ont fait leurs preuves dans la pratique.

» Les deux méthodes employées pour obtenir la multiplicité des sensibilités ampères sont : d'une part, la méthode du shunt non inductif ; d'autre part, la méthode des circuits amovibles. Chacune d'elles a ses avantages particuliers et, suivant les cas, c'est tantôt l'une, tantôt l'autre qui peut donner les meilleurs résultats pratiques. La méthode des circuits amovibles, qui est une solution plus générale, ne comportant pas de restriction, a l'inconvénient d'être un peu plus compliquée comme emploi et plus coûteuse comme construction. La méthode du shunt non inductif, plus simple d'emploi et moins coûteuse, a l'inconvénient d'exiger des circuits actifs un minimum d'encombrement, ce qui limite la capacité de surcharge. De sorte que le shunt non inductif paraît être la meilleure solution dans le cas des ampèremètres, où la surcharge est accidentelle, puisqu'on n'a pas l'habitude de laisser en circuit un appareil dont l'index dépasse l'extrémité de l'échelle, tandis que dans le cas des wattmètres, le shunt non inductif, s'il offre des avantages comparables au circuit amovible pour les mesures avec $\cos \varphi$ supérieur à 0,5, est moins recommandable pour les mesures sous grand déphasage, où le circuit ampère doit pou-

voir supporter des intensités de surcharge élevées pour conserver à l'appareil une sensibilité convenable.

» Or, en ce qui concerne les ampèremètres électrodynamiques, en dehors de la solution connue mais limitée du couplage série-parallèle, la seule solution que nous ayons pu présenter jusqu'ici pour la multiplicité des sensibilités ampères était une solution mixte, se rattachant à la fois aux deux méthodes ci-dessus. Le schéma classique de l'ampèremètre étant celui de la figure 1, on obtient le changement de sensibilité par l'amovibilité de la bobine de champ B et le changement du shunt S sur lequel le cadre mobile b est monté en dérivation. Mais on voit qu'un appareil complet à sensibilités multiples exige ainsi une série complète de bobines de champ B en même temps qu'une série correspondante de shunts S. La solution est coûteuse et le changement de sensibilité n'est pas une opération simple. Néanmoins, les appareils

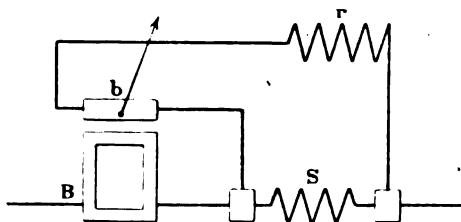


Fig. 1. — Schéma de l'ampèremètre électrodynamique normal.

ainsi constitués ont l'avantage de présenter un couple directeur important, et ce sont de bons étalons pour courants continu et alternatif, pouvant être étalonnés au potentiomètre. D'autre part, l'adjonction d'une bobine amovible voltmétrique et celle d'une résistance additionnelle permettent de les utiliser pour les mesures des tensions et des puissances, à partir de tensions relativement basses (15 volts). Cette solution utilisée par les Ateliers Carpentier depuis dix ans est donc intéressante à bien des points de vue.

Mais il a paru aussi intéressant de chercher à réaliser un ampèremètre électrodynamique à sensibilités multiples, plus simple et non moins précis, et c'est la solution nouvelle dont je veux vous parler ce soir. Cet ampèremètre présente directement deux sensibilités, 5 et 10 ampères, par couplage série-parallèle, et il s'applique à la mesure des courants jusqu'à 300 ampères, en le disposant sur shunts non inductifs absolument comme un appareil ordinaire à cadre mobile. Le schéma simplifié est représenté par la figure 2.

Aux bornes du shunt de 500 millivolts, du modèle déjà employé pour les ampèremètres électromagnétiques ou électrodynamiques et les voltmètres à shunts, on dispose en parallèle, d'une part, un circuit de champ B en lame de cuivre de très petites dimensions, intérieur au cadre mobile, et une résistance de manganin R ; d'autre part, le cadre mobile b et une résistance r. Le circuit de champ est parcouru par un courant de l'ordre de 10 ampères, de sorte

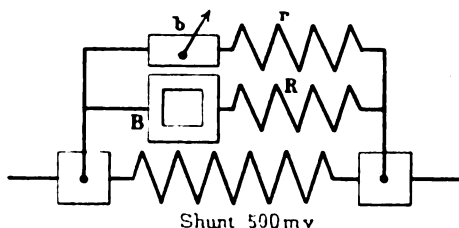


Fig. 2. — Ampèremètre E. D. à shunt. Schéma simplifié.

que la bobine de champ absorbe environ 0,1 volt et la résistance en série 0,4 volt environ. Quant au circuit du cadre mobile, il est parcouru par un courant de 0,2 ampère, et présente une résistance d'environ 2,5 ohms. La bobine de champ ayant une résistance très faible (0,01 ohm environ) et un très petit nombre de tours (15 à 17), on voit que la constante de temps du circuit de champ est comparable à celle du circuit du cadre mobile et que son coefficient de température est aussi du même ordre.

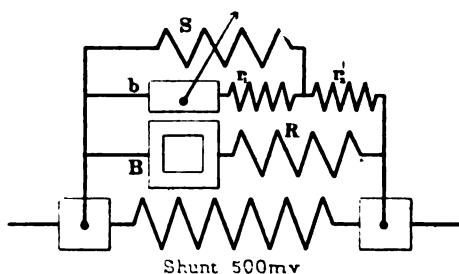


Fig. 3. — Ampèremètre E. D. à shunt avec compensation.

» Mais ce n'est là qu'un schéma simplifié. En réalité, l'appareil ainsi constitué présenterait l'inconvénient d'un coefficient de température relativement élevé, car le coefficient du circuit de champ s'ajouterait à celui du cadre mobile, ce qui conduirait à une valeur trop considérable pour un appareil de précision. Pour arriver à diminuer et même à supprimer cet inconvénient, on a eu

recours au schéma de la figure 3: Une résistance de nickel S à fort coefficient de température (on arrive à trouver du nickel ayant un coefficient de température de près de 0,006, bien que cela ne soit pas courant) est disposée en shunt sur le cadre mobile b et une fraction r_1 de la résistance de manganin mise en série, de telle façon que, pour des valeurs convenables des résistances S , r_1 et r_2 , on obtient une augmentation du courant dans le cadre mobile lorsque la température augmente. En particulier, si on a b (cuivre) = 0,5 ohm, S (nickel) = 0,33 ohm, r_1 (manganin) = 0,5 ohm, r_2 (manganin) = 0,375 ohm, ce qui est à peu près réalisé dans l'appareil, on voit que le courant dans le cadre mobile augmente d'environ 1 millième, pour une élévation de température de 1 degré. C'est donc là, l'équivalent, pour le circuit du cadre mobile, d'un coefficient de température négatif de 1 millième, qui peut compenser rigoureusement le coefficient de température positif du circuit de champ, lequel est de 1 millième aussi. On obtient donc ainsi un ampèremètre électrodynamique sans coefficient de température, c'est-à-dire insensible aux variations de la température ambiante.

» D'autre part, il existe encore une autre cause d'erreur, d'ailleurs peu importante, mais qui peut être compensée, elle aussi. Lorsque l'ampèremètre est laissé en circuit à l'intensité maximum, la bobine de champ s'échauffe de quelques degrés : il y aurait donc, de ce fait, une variation de résistance susceptible d'affecter de quelques millièmes la précision des mesures, si l'on ne choisissait pas la section du shunt de nickel, disposé sur le cadre mobile, de telle sorte que son échauffement et sa variation de résistance viennent compenser l'échauffement de la bobine de champ, du fait du passage prolongé du courant. On peut donc faire disparaître ainsi les causes d'erreur dues aux variations de température.

» Quant à la fréquence, elle agit peu. Les très petits déphasages introduits dans le circuit de champ et dans le circuit du cadre mobile par les enroulements des bobines sont très sensiblement égaux. On n'a donc, comme cause d'erreur, que la différence entre le vecteur, produit des deux courants dérivés, et sa projection sur le courant principal, différence négligeable aux fréquences ordinaires, étant donné le faible déphasage des courants dérivés par rapport au courant principal.

» D'ailleurs, il est possible, si l'on estime intéressant de cher-

cher une compensation plus rigoureuse, au point de vue de la fréquence, de régler empiriquement le shunt de nickel au point de vue de son coefficient de self-induction pour que l'appareil devienne absolument indépendant de la fréquence. Il suffit de bobiner ce shunt sur une carcasse de bobine isolante de diamètre convenable, pour obtenir la compensation cherchée. Mais, comme il ne s'agit là, au total, que d'effets presque insensibles, cette précaution paraît un peu surabondante pratiquement.

» Pourtant, il était bon de signaler ce moyen de compensation qui deviendrait plus nécessaire (quitte même à introduire dans la bobine de nickel un petit noyau de fer réglable) dans le cas où, pour augmenter le couple directeur de l'appareil, on serait amené à introduire quelques tôles de très bonne qualité à l'intérieur de la bobine de champ. Par ce moyen, en effet, on obtient un appareil qui n'est plus un pur électrodynamomètre, puisqu'il contient un peu de fer, mais qui en conserve néanmoins les principales qualités, à condition de n'introduire qu'une très petite masse de fer soumise à une très faible induction ; et, par contre, on augmente ainsi notablement le couple directeur, ce qui, au point de vue pratique, vaut bien un léger sacrifice sur la précision : le tout est de rester dans les limites admissibles.

» Pour vous donner une idée de ce qu'on peut obtenir ainsi, voici les sensibilités comparées d'un même appareil électrodynamique avec et sans noyau de fer. Tandis que, sans fer, le cadre mobile exige un courant de 0,2 ampère pour la déviation totale, la bobine de champ étant parcourue par un courant de 10 ampères, on obtient la même déviation avec un courant de 0,1 ampère dans le cadre mobile lorsqu'on introduit un très petit noyau de fer au centre de la bobine de champ. Et, à condition de choisir les tôles ainsi employées, de façon à réduire au minimum l'hystérésis et la rémanence, les mesures ne sont pas affectées de plus de 0,5 pour 100 d'erreur, tant pour la détermination des ampères, que pour celle des volts et des watts, ainsi que nous le verrons plus loin.

» Comme on peut le remarquer en considérant les chiffres d'étalonnage obtenus en courant continu pour un courant direct et inverse, l'influence du champ terrestre, et, en général, de tous les champs extérieurs, est très faible relativement. Ceci est dû à ce que l'appareil est entièrement cuirassé par une boîte en tôle de fer : il y a là encore une particularité intéressante dans le cas

des électrodynamomètres, qui sont généralement très sensibles à l'influence des champs extérieurs.

» Voici quelques chiffres à l'appui des remarques précédentes :

» 1° On a porté l'appareil à deux températures assez notablement différentes et on a fait soigneusement l'étalonnage dans les deux cas pour mettre en évidence l'influence d'une variation de température ambiante. Les chiffres obtenus vers le point 100, où on a le maximum de sensibilité, sont les suivants :

Essai en courant continu (sensibilité 10 A)	Température ambiante	intensité (étalon à cadre mobile et aimant) ampères	Ampèremètre électrodynamique			
			intensité (courant direct) ampères	intensité (courant inverse) ampères	intensité moyenne ampères	tension aux bornes millivolts
	11° C	9.85	9.825	9.865	9.845	492,5
	33° C	9.85	9.910	9.750	9.930	493,

» On trouve ainsi, pour la mesure du courant, un coefficient de température de 4 dix-millièmes par degré, qui s'explique par le fait que la compensation n'était pas tout à fait parfaite dans l'appareil essayé, le nickel employé n'ayant lui-même qu'un coefficient de température de 4,7 millièmes, au lieu de 6 millièmes, qu'on peut réaliser.

» 2° Le même appareil ayant été laissé en circuit pendant deux heures à l'intensité maximum, on a obtenu les chiffres suivants :

Essai en courant continu (sensibilité 10 A)	Temps	intensité (étalon à cadre mobile et aimant) ampères	Ampèremètre électrodynamique			
			intensité (courant direct) ampères	intensité (courant inverse) ampères	intensité moyenne ampères	tension aux bornes millivolts
	au début	100.0	99,8	100,2	100,0	500,0
	après 2 h.	100,0	100.4	100,8	100,6	500,5

» Même remarque que précédemment au sujet de la compensation qui n'est pas tout à fait complète à cause du nickel employé.

» 3° Le même appareil, disposé sur shunt 100 ampères et essayé en courant continu et en courant alternatif (50 p:s) par comparaison avec un ampèremètre thermique et un ampèremètre électromagnétique 100 ampères sans shunt, a donné les résultats suivants :

	Ampèremètre thermique	Ampèremètre électromagnétique 100 A	Ampèremètre électrodynamique sur shunt 100 A
courant continu	90 amp.	90,0 (moyenne)	89 95 (moyenne)
courant alternatif (50 p:s)	90,0	90,0	90,5

» L'influence de la fréquence est, comme on le voit, négligeable.



Fig. 4. — Boîte de contrôle électrodynamique.

» Il a donc été possible de composer une boîte de contrôle électrodynamique (fig. 4), comprenant voltmètre et ampèremètre, et présentant les sensibilités suivantes : pour les volts, 30, 75, 150, 300, 600, et pour les ampères 0,1, 5, 10, 30, 100, 300. Les premiers résultats obtenus au point de vue de la précision sont déjà supérieurs à ceux que donnent les appareils similaires, et il nous paraît que, moyennant une mise au point particulièrement soignée, on doit pouvoir, avec ce système d'appareils, obtenir en courant alternatif une précision tout à fait comparable à celle que donnent

les appareils à cadre mobile en courant continu, surtout pour la mesure des intensités qui, jusqu'ici, a toujours été très délicate en courant alternatif.

» Une autre application à signaler est l'emploi simultanément de l'ampèremètre électrodynamique à shunts pour la mesure des puissances.

» Cette dernière mesure s'obtient, en effet, si facilement, qu'on aurait tort de s'en priver. On voit, en effet, qu'il suffit d'alimenter le circuit du cadre mobile indépendamment des ampères, en

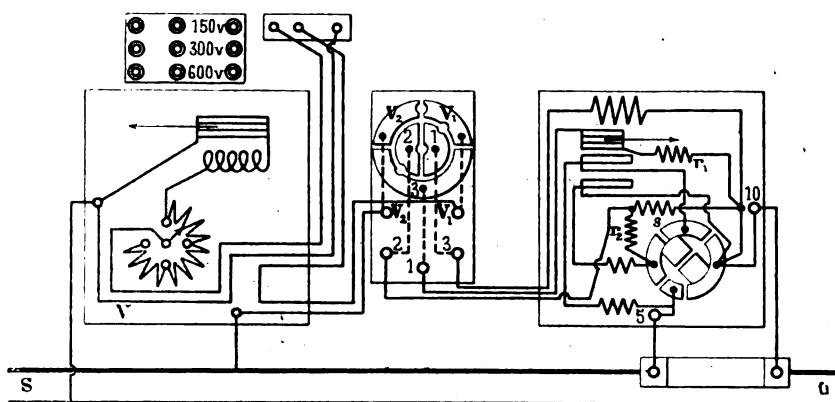


Fig. 5. — Boîte électrodynamique J. Carpentier. Schéma des connexions.

— Mesure des volts et ampères, fiches entre $\begin{matrix} V_2 - V_1 \\ 1 - 2 \end{matrix}$. — Mesure des volts et watts : fiches entre $\begin{matrix} V_1 - 1 \\ 2 - 3 \end{matrix}$.

le branchant sur la tension avec une résistance en série, pour obtenir la mesure des puissances, avec changement de la sensibilité ampère par simple changement de shunt. On retrouve ainsi le schéma du wattmètre à shunts que je vous ai présenté en 1912. Le schéma de la figure 5 rend compte des connexions à réaliser pour obtenir ce résultat. Il suffit d'adjoindre à la boîte de contrôle précédente un commutateur très simple pour obtenir la mesure des tensions en même temps que, successivement et à volonté, celle des intensités ou des puissances. On a donc ainsi sous un très faible volume la boîte de contrôle électrodynamique complète pour courant continu et alternatif, donnant les mesures des tensions et des intensités ou des puissances jusque 600 volts et 300 ampères.

» Mais on peut aussi, si on accepte de ne pas faire des mesu-

res simultanées, grouper dans un seul appareil, électrodynamomètre universel à shunts, les trois fonctions ci-dessus.

• » Le schéma de la figure 6 montre comment on peut obtenir le résultat cherché par la simple manœuvre d'un commutateur C, sans avoir à toucher aux connexions. (1) Nous avons déjà présenté, en 1912, un électrodynamomètre analogue, mais qui ne s'appliquait pas à la mesure des intensités en courant continu et qui ne pouvait changer de sensibilité ampère qu'en employant une série de transformateurs d'intensité. L'appareil, représenté par la figure 7, mesure successivement intensités, tensions et puissances, aussi bien en courant continu qu'en courant alternatif, et le chan-

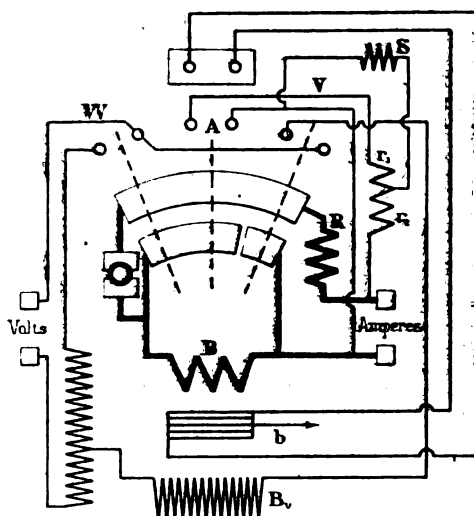


Fig. 6. — Electro-dynamomètre universel à shunt. Schéma des connexions.

gement de sensibilités ampères s'obtient par simple changement de shunt: il y a donc là un progrès intéressant à signaler. Le premier appareil réalisé suivant ce schéma, représenté par la figure 7, nous a bien donné le résultat prévu, mais il présente à notre gré un couple directeur encore un peu faible pour un appareil de contrôle essentiellement transportable et industriel. Un dimensionnement plus convenable des circuits et l'introduction d'un petit noyau

(1) On voit, en effet, sur ce schéma que les deux balais reliés au cadre mobile, en venant fermer les circuits de tension correspondant aux trois positions A, V, W, tandis qu'un autre frotteur solidaire mécaniquement de ce double balai, court-circuite les secteurs correspondants du circuit « ampères », permettent la réalisation des schémas nécessaires.

de fer dans la bobine de champ nous a permis de l'améliorer encore à ce point de vue.

» L'électrodynamomètre universel à shunts que voici, malgré l'introduction du petit noyau de tôles ordinaires dont il est muni, se tient dans les limites de précision qu'on peut demander à un appareil industriel, puisqu'il peut assurer en général une précision supérieure à 1 pour 100 dans les mesures diverses qu'il permet d'effectuer. Et il est permis d'espérer qu'avec des tôles tout à fait spéciales, on arriverait encore à mieux. D'ailleurs, il a un

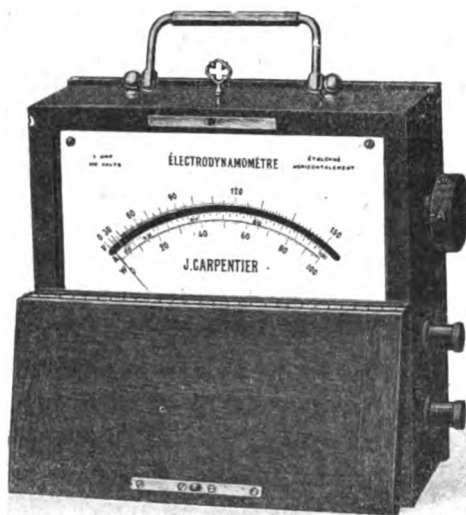


Fig. 7. — Electro-dynamomètre universel à shunt.

couple directeur convenable, et ses principales caractéristiques au point de vue de la consommation sont les suivantes :

- » Consommation dans le fil fin du wattmètre : 0,090 ampère.
- » Consommation en voltmètre : 0,105 ampère.
- » Différence de potentiel maximum aux bornes des shunts : 0,500 volt.

» Nous espérons donc être arrivés ainsi à une solution satisfaisante du problème de la mesure des intensités, des tensions et des puissances par un appareil unique, problème que nous étudions depuis longtemps déjà, puisque nous avons commencé à en présenter une première solution, imparfaite, il est vrai, en 1906, avec le thermique J. Carpentier, qui mesurait déjà intensités, ten-

sions et puissances, avec changement de sensibilité ampères par shunts.

» En résumé, les divers appareils, que je vous ai présentés ce soir, se rattachent tous au schéma de l'ampèremètre électrodynamique à shunt que je vous ai indiqué, et qui me paraît susceptible d'introduire dans la mesure des intensités, qui était restée le point faible des mesures en courant alternatif, un élément nouveau au point de vue de la précision et de la multiplicité des sensibilités. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Joly.

THÉORIE ÉLECTRIQUE MODERNE DE L'ÉTAT SOLIDE

Indications sommaires sur l'atome planétaire de Rutherford-Bohr, Rôle des quanta.

Indications sommaires sur les théories électroniques de la valence. — Critique.

La constitution électrique des solides. — Difficultés théoriques. — Travaux de Born et de Landé.

Conclusions. — Importance technique que pourrait avoir une théorie précise.

M. Marcel BRILLOUIN. — « Une théorie précise des propriétés électriques des solides, permettant des prévisions numériques, au moyen de quelques principes bien définis et de la connaissance de la constitution chimique du solide, aurait évidemment un grand intérêt, théorique et pratique.

» La prévision de la conductibilité des alliages, de la réfraction, de la dispersion et de l'absorption des verres, des propriétés diélectriques des isolants, serait évidemment très importante pour les techniciens. Ce n'est pas toutefois dans cette direction que se sont produits les progrès les plus récents, mais dans une autre, bien plus inattendue : c'est la distance d'équilibre de deux atomes ionisés, — de sodium et de chlore, par exemple — que Born a réussi à déterminer en partant de données purement électriques relatives à ces atomes, et des règles de quantification de Bohr. C'est aussi la compressibilité cubique de quelques cristaux. Et les résultats numériques ainsi obtenus sont étonnamment proches de ceux que donne l'expérience.

» Le caractère de ces travaux récents, c'est la précision des hypothèses. On a tant abusé, depuis un siècle, des mots « électrique » et « magnétique », qu'il est bon d'insister un peu.

» 2° Nous appelons *électromagnétiques* les phénomènes conformes aux équations de Maxwell-Hertz, et seulement ceux-là. Nous y ajoutons la notion expérimentale d'électron (de charge $-4,774 \cdot 10^{-10}$ U. E. S.) et de *noyau positif* (de charge multiple entier de $+4,774 \cdot 10^{-10}$ U. E. S.) ; ces notions ne sont pas contenues dans les équations de Maxwell-Hertz, mais elles sont compatibles avec ces équations.

» Les équations du champ de Maxwell-Hertz sont des équations aux dérivées partielles ; les équations du mouvement de l'électron, soumis à la force donnée par la formule de Lorentz, sont des équations différentielles. Il reste donc, dans toute solution exprimée en termes finis, des constantes d'intégration que la théorie

électromagnétique laisse arbitraires. C'est le Danois Nils Bohr qui a énoncé les règles grâce auxquelles on détermine actuellement ces constantes d'intégration, à l'aide de la notion des *quanta*, introduite d'abord dans la statistique du rayonnement noir par Planck, il y a près de vingt ans.

» C'est cette notion qui, en fixant les dimensions de l'atome, détermine son champ extérieur sans ambiguïté, permet des prévisions précises — et par conséquent contrôlables, — dans les deux domaines si différents de la spectroscopie et de l'élasticité des cristaux.

» A la vérité, le rôle des règles de Bohr est un peu plus complexe ; ces règles nous forcent à admettre que, *dans le domaine interne de l'atome*, les équations de Maxwell-Hertz cessent d'être rigoureuses et doivent être complétées ou corrigées d'une manière que nous ne sommes pas encore en état de décrire en détail, mais dont les règles de Bohr permettent de suivre avec une extraordinaire exactitude les conséquences spectroscopiques.

I. COUP D'ŒIL RÉTROSPECTIF

» 3° Puisque c'est le succès, remarquablement précis, des règles de Bohr (complétées par la relativité restreinte) dans le domaine spectroscopique qui a définitivement montré aux physiciens comment il faut introduire les *quanta* dans les théories physiques, il n'est pas inutile de donner à ce sujet quelques indications sommaires ⁽¹⁾.

» Pour élucider la constitution physique de l'atome, les physiciens ont accumulé, depuis la découverte des raies d'émission par Kirchhoff et Bunsen, une prodigieuse moisson de documents précis. Mais, pendant plus de cinquante ans, ils n'ont pas trouvé le fil conducteur. Pour retrouver des vibrations propres aussi rigoureusement définies, les physiciens pouvaient songer, et songèrent effectivement à des systèmes — mécaniques ou électromagnétiques — ayant dans les conditions ordinaires, c'est-à-dire aux

⁽¹⁾ Pour les détails et la bibliographie, voir :

En français : Edouard BAUER, professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg. *La théorie de Bohr, la constitution de l'atome et la classification périodique des éléments* (52 pages), Paris, Hermann, 1922.

En allemand : N. BOHR. *Abhandlungen über Atombau, aus den Jahren 1913-1916*. Traduction allemande de mémoires publiés en anglais ou en danois (150 pages). Wieweg, 1921.

A. SOMMERFELD. *Atombau und Spectrallinien*, 3^e édition (764 pages). Wieweg, 1922. C'est l'ouvrage fondamental.

basses températures, une structure d'équilibre unique et bien définie, comme cela semblait nécessaire pour que l'individualité chimique de l'atome fût bien caractérisée. Autour de cette structure d'équilibre, des oscillations périodiques simples, à périodes propres bien définies, auraient été excitées, soit par les chocs dus à l'agitation thermique, soit par des décharges électriques. De telles vues paraissent confirmées par leur succès dans la théorie de la dispersion de la lumière, en particulier, de l'absorption et de la dispersion anormale.

» 4° On pouvait imaginer, soit un système de points avec un nombre fini, mais grand, de libertés; soit un milieu continu occupant un domaine fini, avec un nombre infini de libertés, et des périodes propres dépendant de trois suites infinies de nombres entiers ; soit même un obstacle rigide immergé dans l'éther, les périodes étant celles des vibrations propres (malheureusement très amorties) de l'éther extérieur au corps ⁽¹⁾.

» Remarquons, d'abord, qu'aucune propriété physique générale ne permettait de fixer, à priori, les dimensions de la structure plus ou moins complexe qu'on cherchait à assimiler à l'atome. On pouvait donc toujours faire en sorte qu'une période propre du système eût telle valeur que l'on se fixait à l'avance. En outre, dans le cas du système de points, on pouvait disposer — sous réserve de conditions de symétrie évidentes — d'un certain nombre de paramètres dynamiques. Pour des corps étendus, on avait à sa disposition la distribution des densités et élasticités. Il semblait donc qu'on ne fût gêné que par une trop grande indétermination, et qu'on dût sûrement réussir à représenter les spectres — au moins les plus simples — et même de plusieurs manières

» 5° Les essais pourtant restèrent infructueux. Le classement des vibrations propres d'après les nombres entiers, tel que l'indiquent les théories, même prises sous leur forme la plus générale, ne ressemble pas du tout au classement que fournit l'observation. En particulier, les raies d'une même série se resserrent de plus en plus vers le violet, et la fréquence tend vers une limite finie qu'elle ne dépasse pas. Il a été démontré par Hadamard, à l'aide de raisonnements généraux dus à Fredholm, que ce caractère ne peut.

⁽¹⁾ Par exemple : M. BRILLOUIN; Sur le degré de complexité des molécules gazeuses. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXII, 1891. Vibrations propres d'un milieu extérieur à un solide. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXVII, 1893, et *Ann. de Ch. et de Phys.* 1894.

jamais se rencontrer pour les vibrations propres, autour de l'équilibre des systèmes mécaniques ou électriques, quelque structure qu'on leur attribue.

» Ce n'est qu'en imaginant une constitution très singulière soumise à des lois d'action sans analogue dans la nature, que Ritz a pu former des équations aux dérivées partielles conduisant à des vibrations propres de même caractère que les raies des atomes. ⁽¹⁾

» En outre, tous ces systèmes mécaniques ou électriques conduisaient à des expressions rationnelles ou transcendantes du carré de la fréquence, en fonction du rang de la raie.

» Or, en 1885, Balmer avait réussi à donner une formule très simple pour la longueur d'onde des raies stellaires de l'hydrogène, et Rydberg a ramené à un aspect encore plus simple cette formule en lui faisant représenter la fréquence :

$$\nu = 109\,678 \left[\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right] 3 \cdot 10^{10} \quad (\text{C. G. S.})$$

n est le rang de la raie (en commençant à 3). La concordance est rigoureuse. C'est donc la fréquence elle-même, et non son carré, dont l'expression est simple en fonction du rang de la raie.

» Cela suffit à faire rejeter tous les systèmes dans lesquels les vibrations propres proviennent du conflit entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle pure; il faut mettre en jeu l'une quelconque des deux et une énergie mixte, proportionnelle à la vitesse et non à son carré. ⁽²⁾

» Cette remarque, déjà importante, de Lord Rayleigh, était précédée de quelques lignes, qu'il faut citer, parce qu'on y trouve le premier germe des idées actuelles :

» ...Dans ce cas, au lieu de supposer que toute la série de raies
» correspond aux différents modes vibratoires d'un système com-
» pliqué, nous attribuons chaque raie à un système différent, vi-
» brant suivant un mode spécial. »...

» C'est cette remarque que Ritz a reprise sous une forme à peine différente de l'une de celles étudiées par Rayleigh: Le système est formé d'une file de n petits aimants, avec un électron qui circule autour de l'axe de la file; celui-ci a, sous l'action de la force

⁽¹⁾ Œuvres de Ritz, Gauthier-Villars, 1911. I. *Zur Theorie der Serien-spectren*. Diss. Inaug. de Göttingen, 1903.

⁽²⁾ Lord RAYLEIGH. *Phil. Mag.*, 1897, p. 356-362, ou *Papers*, t. IV, p. 340 (n° 235). On the propagation of waves along connected systems of similar bodies (paragraphe final).

électromagnétique de Lorentz, une période de circulation qui dépend de n comme les raies de l'hydrogène. ⁽¹⁾ Ainsi, à chaque raie correspondrait une constitution particulière de l'atome. Ce n'est pas la configuration permanente de tout l'atome qui le caractériserait chimiquement, tandis que les oscillations de divers types autour de cette configuration unique correspondraient aux raies, comme on l'avait toujours supposé jusque-là. La propriété permanente caractéristique au point de vue chimique n'empêcherait pas l'atome d'adopter un très grand nombre de configurations distinctes, à chacune desquelles correspondrait une raie et une seule ; l'atome posséderait une (ou un petit nombre) liberté variable dans une très grande étendue, par petits sauts finis, et autour de chacune de ces déterminations particulières de la liberté unique se produirait la raie de rang correspondant.

» 6° A cette époque (1907), le magnéton de Weiss n'avait pas encore conquis droit de cité ; la constitution imaginée par Ritz apparut ingénieuse et suggestive, mais un peu trop artificielle.

» C'est l'électron, dont l'identité, quelle que fût son origine, devenait de plus en plus certaine, qui paraissait être à tous les physiciens un des éléments fondamentaux entrant dans tous les édifices atomiques, — puisqu'on peut l'extraire de tous. On peut, d'ailleurs, construire le magnétisme avec l'électron en mouvement, tandis qu'aucune association d'éléments magnétiques ne peut ramener à l'électron, statique. Le second élément, puisque l'atome est généralement neutre, est une charge positive, de même grandeur absolue, ou un multiple entier de celle-ci.

» L'électron et son complément positif ne peuvent pas, d'ailleurs, rester immobiles, car, c'est un des plus vieux théorèmes des actions en raison inverse du carré de la distance qu'une telle disposition est instable :

» *Dans le champ de masses positives ou négatives quelconques, il n'y a ni maximum ni minimum du potentiel en dehors des masses agissantes. Il n'y a donc pour une nouvelle masse aucune position d'équilibre stable ; cette masse nouvelle viendra se coller à l'une de celles qui produisent le champ, ou sera rejetée au loin.*

» L'édifice atomique sera donc formé d'une masse positive, à

⁽¹⁾ Œuvres V. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1907, t. CXLIV.

VI. — *Id.* 1907, t. CXLV.

VII. — *Ann. der Phys.* 1908, t. XXV.

laquelle on est conduit par les expériences à attribuer toute l'inertie matérielle de l'atome, et d'un ou plusieurs électrons circulant dans le champ de la masse positive.

» 7° Au sujet du domaine occupé par la masse positive, je laisse de côté une hypothèse proposée et suivie dans ses conséquences avec une très intéressante précision par J.-J. Thomson.

» Les observations variées sur l'ionisation, et sur les propriétés des substances radioactives, surtout celles de sir J. Rutherford, ont conduit à abandonner l'édifice de J. J. Thomson, et à revenir à une très vieille conception, celle de l'*atome planétaire*.

» L'atome est supposé formé d'un centre ou *noyau* positif, extrêmement petit, autour duquel un ou plusieurs électrons circulent suivant des orbites sensiblement képlériennes. Le *noyau* est caractérisé par un *nombre entier* ou *numéro atomique*, qui indique combien il porte de charges élémentaires positives. C'est en même temps son rang dans la classification périodique de Mendelejeff, si voisine de celle proposée antérieurement par l'ingénieur des mines Clancourtois, sous le nom imagé de « vis tellurique ». ⁽¹⁾ L'atome neutre a un système planétaire formé d'un nombre d'électrons égal à son *numéro atomique* ; l'atome devient un ion positif ou négatif suivant qu'il a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons.

» Admettons, comme donnée de fait, l'existence de l'électron et du noyau, sans entrer dans la discussion de leur droit à la stabilité en théorie électromagnétique stricte.

» L'atome planétaire formé d'un noyau et d'électrons qui circulent autour de lui est stable, du moins tant qu'on néglige les actions électromagnétiques pour s'en tenir aux actions électrostatiques. En réalité, puisque l'électron a un mouvement orbital autour du noyau, il a une accélération, et les lois de Maxwell-

(¹) Pour tout ce qui concerne les caractères chimiques de l'atome, et les questions de valence voir :

En allemand : KOSSEL. *Ann. der Physik*, 1916, t. XLIX.

En anglais : LANGMUIR. *J. Amer. Ch. Soc.*, 1919 et 1920.

En français : LÉPAPE. *La discontinuité et l'unité de la matière*. Conf. au Lab. de M. Moureu, 1921. P. Dupont, 1922.

MAUGUIN. *Théorie électronique de la valence*. Institut intern. de Chimie. Solvay, Bruxelles, 1922.

BORN. *La constitution de la matière*. Blanchard, 1922.

LEDoux-LEBARD et DAUVILLIER. *La Physique des Rayons X*. Gauthier-Villars, 1921.

DE BROGLIE. *Conférences-Rapports du mardi*, déc. 1921.

Hertz exigent qu'il rayonne de l'énergie proportionnellement au carré de l'accélération, c'est-à-dire sans relâche. ⁽¹⁾ Par suite de ce rayonnement, l'orbite change incessamment, avec perte d'énergie totale ; l'électron se rapproche constamment du noyau positif qui l'attire. A la vérité, ce qu'il perd à chaque tour n'est presque rien, mais comme il fait des milliards de tours par seconde autour du noyau, il ne lui faudrait pas beaucoup de secondes pour venir s'incorporer au noyau.

» Ainsi, en théorie électromagnétique stricte :

» 1° *Aucun principe ne permet de choisir les dimensions d'une orbite ;*

» 2° *Aucune orbite ne peut conserver ses dimensions initiales ; à notre échelle de durée, la concentration serait très rapide.*

» A ce double titre, l'atome planétaire n'a pas de dimensions définies ; les rayons des orbites décroissent sans arrêt, par degrés insensibles. L'atome planétaire, *électromagnétique pur*, ne possède pas la quasi-éternité de l'atome chimique réel, et de plus, ses dimensions sont indéterminées. Il n'est pas bon non plus pour la spectroscopie, puisque la durée d'une révolution se raccourcit par degrés insensibles et continus à mesure que le rayonnement ininterrompu réduit le grand axe de l'orbite.

» En d'autres termes, un peu brefs : *Un atome ÉLECTROMAGNÉTIQUE PUR est impossible.*

» 8° D'autre part, tout ce que nous savons de l'électromagnétique macroscopique, de l'optique, de la photoélectricité, de la radioactivité, nous impose l'idée que les phénomènes électromagnétiques jouent un rôle fondamental dans toutes les propriétés de l'atome, et cela sous une forme extrêmement voisine de celle que figure l'atome planétaire à noyau central ; il faut donc chercher à *compléter* et à *corriger* dans le *domaine circumnucléaire* les lois électromagnétiques, dont nous connaissons la rigoureuse exactitude à distance sensible des masses agissantes, positives ou négatives.

» C'est ce qu'a fait, il y a dix ans, de la manière à la fois la plus heureuse et la plus audacieuse, un élève de sir Rutherford, le Danois Nils Bohr.

(1) LANGEVIN; Sur l'origine des radiations et l'inertie électromagnétique. *Journ. de Phys.*, mars 1905.

II. L'ATOME DE BOHR

» 9° Il faut d'abord trouver une règle qui fixe les dimensions des orbites, et par conséquent, l'encombrement des atomes. Pour cela, Bohr a utilisé les *quanta* sous la forme tout à fait satisfaisante qui est devenue classique par les travaux de Sommerfeld, Ehrenfest et quelques autres. Il a *quantifié l'action angulaire*, pour les orbites circulaires, ce qui détermine les rayons possibles a_n , suivant le nombre n de *quanta* h :

$$(1) \quad a_n = n^2 \cdot \frac{h^2}{4 \pi^2 m e^2} \cdot \frac{1}{N^2}$$

» où m est la masse de l'électron, $0,9 \cdot 10^{-27}$ g;

» e , la charge de l'électron, $4,774 \cdot 10^{-10}$ U.E.S.;

» h , l'élément d'action, $6,547 \cdot 10^{-27}$ C.G.S.;

» N , le nombre atomique du noyau; (*)

» n , le nombre entier de quanta de l'orbite.

» La fréquence ν (inverse de la période) en résulte :

$$(2) \quad \nu_n = \frac{4 \pi^2 m e^4}{h^3} \sqrt{N^2} \times \frac{1}{n^3}$$

» Cette loi de fréquence n'est pas du tout la loi spectrale.

» Bornons-nous au seul cas simple, celui de l'hydrogène $N = 1$, qui n'a qu'un seul électron circulant autour du noyau. D'après cette première règle de Bohr, l'électron peut circuler sur une quelconque des circonférences dont les rayons a_n sont donnés dans le tableau suivant, ainsi que les longueurs d'onde (en microns) correspondant à leurs fréquences :

» n	1	2	3	4	5	10	20
» $10^8 a_n$	0,55	2,2	4,95	8,8	13,25	55	220
» λ_n	0,0457	0,365	1,33	3,15	5,70	45,7	365

» On remarquera que λ_1 , la longueur d'onde correspondant à la circulation sur l'anneau le plus petit, est dans le domaine des rayons Roentgen; λ_2 est dans le domaine optique (vert bleu) ; λ_3 dans le domaine infra-rouge ; etc.

» Bohr a admis que, contrairement aux lois de l'électromagnétisme macroscopique, les électrons ne rayonnent pas lorsqu'ils cir-

(*) Ou nombre *virtuel*, résultant du noyau et des couches d'électrons autres que celui qu'on considère ; Sommerfeld a donné une théorie très suffisante du calcul de ce nombre virtuel (Z' dans ses notations).

culent sur ces orbites, — et seulement sur celles-là. D'où leur permanence, et leur rôle privilégié dans toutes les manifestations des propriétés permanentes de l'atome.

» Sommerfeld a montré qu'on doit considérer comme également privilégiées des orbites elliptiques képlériennes, dont on a *quantifié l'action angulaire, et l'action radiale*. Celles-ci sont donc caractérisées par *deux nombres entiers*.

» Ni Bohr, ni Sommerfeld n'ont cherché en quoi consisterait la modification à apporter, dans le domaine circumnucléaire, aux lois de Maxwell-Hertz, pour que la règle de stabilité de Bohr en résulte, et cela ne paraît pas facile. ⁽¹⁾

» 10°. Ainsi, toutes ces orbites sont stables, mais inégalement. Comment va-t-on juger de leur stabilité ? Par les règles les plus classiques. L'orbite la plus stable est la plus proche du noyau, celle pour laquelle l'énergie attractive du noyau et de l'électron a le plus diminué, en prenant uniquement l'énergie électrostatique ordinaire et l'énergie cinétique, *sans y joindre aucune énergie relative aux influences circumnucléaires qui se manifestent par la stabilisation des orbites quantifiées*. Il y a là une hypothèse qu'on a toujours négligé d'énoncer jusqu'à présent, bien que ce soit tout à fait nécessaire, à mon avis. Ainsi évaluée, l'énergie sur une orbite n , a_n , est, en prenant comme énergie à l'infini la valeur E_∞ , constante qu'aucune règle ne nous permet d'évaluer,

$$(3) \quad E_n = E_\infty - \frac{1}{2} N \frac{e^2}{a_n} = E_\infty - \frac{4\pi^2 m e^4 N^3}{2 h^2 n^3}$$

$$E_n = E_\infty - \frac{h \nu_n}{2} \frac{n}{\sqrt{N}}$$

» Pour faire une évaluation numérique de la stabilité, Bohr compare les valeurs absolues du terme soustractif. ⁽²⁾

» C'est l'orbite a_1 ($n = 1$) du plus petit rayon, qui est la plus stable ; c'est elle qui représente la forme permanente de l'atome d'hydrogène. Celui-ci a donc besoin, pour son existence, d'un espace disponible d'un peu plus d'un *angstrom* (10^{-8} cm) de diamètre ; c'est une dimension comparable à la distance de deux molécules à l'état solide ou liquide. Mais dans l'état gazeux, sur-

⁽¹⁾ M. BRILLOUIN ; Atome de Bohr. Fonction de Lagrange circumnucléaire. *Journ. de Phys. et le Rad.*, mars 1922.

⁽²⁾ Voir en particulier l'analyse du dernier mémoire danois de Bohr par L. Bloch. *Journal de Physique et le Radium*, 1922.

tout très raréfié, comme dans certaines nébuleuses, la distance moyenne des noyaux peut être beaucoup plus grande et laisser la place libre au développement de plusieurs des autres orbites privilégiées, $a_1, a_2 \dots a_{10}$.

» Le calcul effectué pour des noyaux de nombre atomique élevé indique des orbites plus petites, dont plusieurs sont simultanément occupées par des électrons ; l'atome stable à plusieurs couches d'électrons occupe un domaine total dont le diamètre diminue lentement quand N augmente. Plusieurs des orbites centrales ont alors des fréquences de rayons X ; ce sont les « *niveaux* » que révèle la spectroscopie des rayons X.

» Revenons à l'hydrogène, ($N = 1$) et portons notre attention sur la longueur d'onde du deuxième niveau $\lambda_2 = 0,3646$. Cette longueur d'onde est calculée à partir de la théorie de Bohr, qui n'introduit que des grandeurs électriques, mesurées à peu près au millième, et la constante de Planck. Or, au même degré de précision, elle est identique à la longueur d'onde limite du spectre de Balmer, que la spectroscopie fait connaître au cent-millième près. Il y a là une coïncidence numérique trop complète pour être due à un hasard heureux. Il en est de même pour la longueur d'onde de la troisième orbite λ_3 , qui est exactement la longueur d'onde limite d'une série infra-rouge de l'hydrogène.

» Les fréquences des orbites privilégiées de Bohr, sont les fréquences limites de chacune des séries de raies que l'atome est capable d'émettre par des excitations convenables.

» Il semble bien que ce soit là une loi générale.

» 11° La première règle de Bohr donne les fréquences limites de chaque série. La seconde va faire connaître la distribution des raies dans chaque série ; on comprendra de suite comment Bohr a été conduit à l'énoncer (je suppose) en regardant la formule (3) de l'énergie, qui permet d'écrire immédiatement pour l'hydrogène :

$$(4) \quad E_n - E_{n'} = -\frac{4\pi^2 m e^4}{2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) = 4 R h \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

en appelant R la constante de Rydberg (formule de Balmer écrite en fréquences).

» On obtient les fréquences ν des raies d'une même série en écrivant que la différence des énergies correspondant à deux orbites de rang n élevé, variable, et de rang n' , petit, fixe pour une même série, est égal à $h \nu$.

» Bohr imagine que, par des actions violentes, telles que la décharge électrique, l'électron de quelques atomes a été chassé d'une des orbites centrales, les plus stables, et est allé pour quelque temps circuler sur une orbite éloignée. Cette orbite étant peu stable, l'électron en est facilement détaché et retombe sur l'une ou l'autre des orbites centrales. L'hypothèse, heureuse autant qu'audacieuse que traduit la règle de Bohr, est donc que, dans ce retour d'une orbite à l'autre, l'électron provoque, *dans quelque système auxiliaire profondément inconnu jusqu'à présent*, un état périodique pur dont l'énergie se dissipe lentement par rayonnement dans l'éther du vide. Sur le mécanisme de la production de cet état périodique capable de rayonner, l'obscurité la plus complète règne encore ; je ne crois pas que Bohr ait jamais rien dit de précis à ce sujet. Si on en juge par le langage et les règles approximatives dont il fait usage dans ses dernières publications, il semble qu'il pense tout simplement aux perturbations des électrons autour de leurs orbites stables ; mais cela n'est pas encore bien clair. Pour l'hydrogène, qui n'a qu'un électron, serait-ce autour de l'orbite de départ, autour de l'orbite d'arrivée, autour de chacune des orbites stables, en les traversant, que se produiraient les vibrations propres rayonnantes des diverses raies ? Cela ne paraîtrait guère compatible avec des vibrations ayant une période bien définie pendant des millions de vibrations consécutives.

» Jusqu'à présent, dans tous les exposés des règles de Bohr, on évite avec soin de se poser ces questions, ou les analogues qui viennent facilement à l'esprit, probablement pour éviter d'avouer qu'on n'a aucune idée à ce sujet.

» 12° Quoi qu'il en soit, et quelque regrettable que soit l'ignorance où nous sommes de tout le mécanisme vibrant, *la règle n'en est pas moins précise.*

» Pour l'hydrogène :

$$\nu = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

ou numériquement : (C. G. S.)

$$\nu = 109\,678.3 \cdot 10^{10} \cdot \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

en adoptant le coefficient fourni par l'optique, dont les trois (presque les quatre) premiers chiffres sont également fournis par son expression électromagnétique :

- » $n' = 1, n = 2, 3, 4, \dots$ est une série ultra-violette ;
 - » $n' = 2, n = 3, 4, 5, \dots$ est la série optique ;
 - » $n' = 3, n = 4, 5, 6, \dots$ est une série infra-rouge ;
- etc.....
- » Il faudrait un volume, les 700 pages serrées de Sommerfeld,

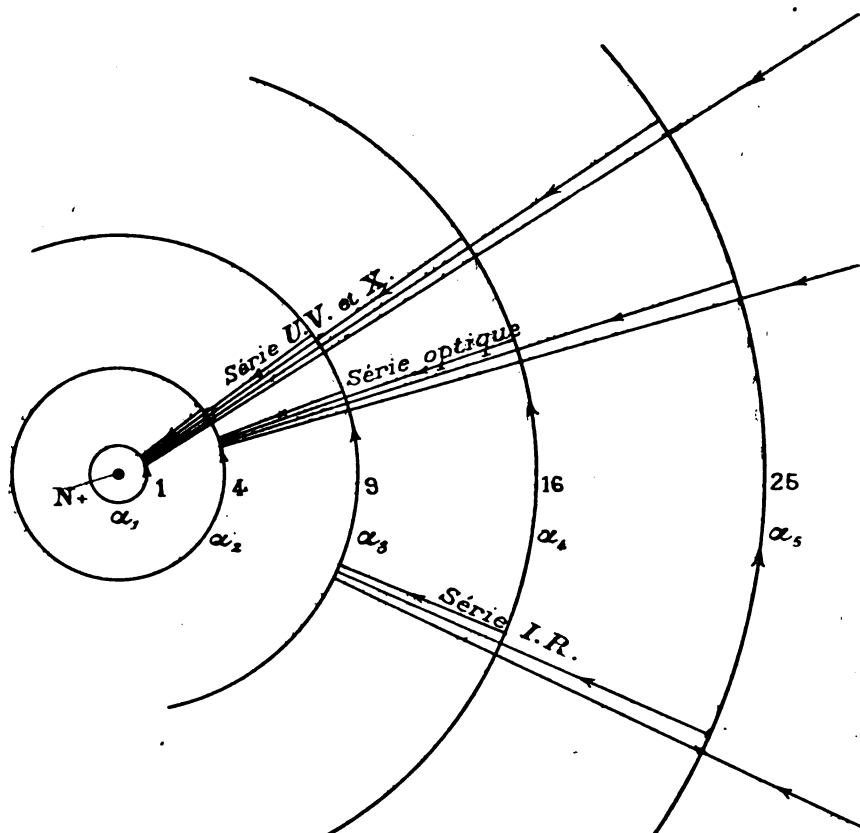


Fig. 1.

pour décrire les innombrables conséquences exactes, — c'est-à-dire rigoureusement conformes aux expériences, — de l'ensemble des deux règles de Bohr, tant pour les spectres ordinaires des divers éléments, que pour la *structure fine* des raies dans le phénomène de Zeemann et dans le phénomène de Stark, et dans tout le domaine des rayons X.

» De quelque manière qu'on arrive plus tard à les rattacher à un mécanisme électromagnétique, les règles de Bohr, commentées par Sommerfeld, joueront pendant longtemps le premier rôle dans la coordination de tout ce qui concerne les raies d'émission.

III. ATOMES DIVERS

» 13° Pour les éléments lourds, à grand *nombre atomique*, et, par conséquent, à nombreux électrons mobiles, j'ai déjà signalé que les électrons, par suite de leurs actions mutuelles, ne s'entassent pas tous sur une même orbite, mais se distribuent, à l'état normal, sur les orbites les plus serrées autour du noyau, en nombre bien déterminé.

» Dans la conception primitive, et simple, de Bohr, il n'y avait qu'un élément à quantifier, les orbites étant supposées circulaires. Il s'agissait simplement de savoir combien d'électrons sont sur l'orbite $n = 1$, combien sur l'orbite $n = 2$, etc. On voit bien que des considérations de stabilité doivent fixer ces nombres, mais la mise en œuvre théorique présente des difficultés évidentes, et a marché moins vite que la curiosité des savants. Ce sont les considérations chimiques, tirées de la classification périodique de Mendelejeff, qui ont fourni les principales indications. Sans entrer dans aucun détail, il suffira d'indiquer les idées directrices.

» Les gaz rares, chimiquement inertes, sont regardés comme constitués de la manière la plus stable ; en particulier, l'orbite extérieure est saturée d'électrons. En passant au corps suivant, l'électron supplémentaire ne trouve plus place sur cette orbite et doit graviter sur l'orbite extérieure la plus voisine ; sur cette orbite (un peu modifiée) viendra aussi se placer le deuxième, puis le troisième électron, des corps qui suivent, jusqu'au nouveau gaz rare, qui sera atteint lorsque cette nouvelle orbite aura « fait son plein » d'électrons. De là se déduirait toute la constitution des atomes. Soient N_{G_k} le nombre atomique du k^{e} gaz rare, à partir de l'hélium ($N = 2$) qui est le premier. La première couche aura deux électrons, la deuxième couche ($N_{G_2} - 2$) soit huit électrons, et, en général, la k^{e} couche ($N_{G_k} - N_{G_{k-1}}$). Pour les corps compris entre ces deux gaz rares, il n'y a que $N - N_{G_{k-1}}$ électrons.

» La combinaison chimique consisterait en un échange d'électrons dits *électrons de valence*, entre les couches extérieures, inégalement incomplètes, de deux corps, avec saturation lorsque le déficit de la couche extérieure de l'un des corps serait exactement comblé par l'accaparement de tous les électrons extérieurs de l'autre corps.

» Plusieurs chimistes et physico-chimistes ont montré, tout au

long, l'accord de ces vues avec un grand nombre de faits chimiques. ⁽¹⁾

» 14° Sans nous aventurer dans le domaine chimique, examinons de plus près la distribution proposée.

» On trouverait donc, en partant de l'intérieur, des couches qui, lorsqu'elles sont complètes (gaz rares), auraient successivement :

2 8 8 18 18 32

électrons, d'après Langmuir.

» Les considérations spectroscopiques, ou les observations sur les rayons X et l'ionisation conduisent à des conclusions analogues, mais non définitives encore ; on en concevra facilement la raison par les remarques suivantes : Pour définir le mouvement d'un électron autour du noyau, il faut trois coordonnées (par exemple l'inclinaison de l'orbite sur le plan du maximum des aires, et, dans le plan de l'orbite, le rayon vecteur et l'angle avec la ligne des nœuds). Il y a donc, en réalité, non pas une *action*, mais *trois actions* à quantifier, ou au moins deux, comme l'a montré Sommerfeld depuis plusieurs années. On ne peut donc pas classer les orbites en une seule série linéaire, mais en une suite ramifiée. Pour un même grand axe (un même quantum des aires), on peut avoir plusieurs ellipses différentes, et situées dans des plans d'inclinaisons différentes. Il ne faut donc pas s'étonner que les premiers essais de classement en une seule ligne, d'après des phénomènes différents, ne soient pas tout à fait identiques. On ne tardera guère à tomber d'accord.

» De ce qui précède, je veux retenir seulement une remarque : La discussion à l'aide de formules assez péniblement obtenues pour les actions mutuelles des électrons a conduit à rejeter la forme primitive d'*hypothèse planétaire*, dans laquelle toutes les orbites étaient supposées *coplanaires*.

» 15° C'est le résultat évident que je tiens à énoncer clairement :

» *Aucun résultat, même qualitatif, de la théorie des perturbations en mécanique céleste ne peut être appliqué aux électrons de l'atome, PARCE QUE LES ÉLECTRONS SE REPOUSSENT, tandis que les planètes s'attirent.*

» Il n'y a donc aucune tendance des orbites à se coucher sur

(1) Ouvrages déjà cités en note au § 7.

un même plan, *au contraire*. Il est facile de s'en convaincre dans le cas de deux électrons seulement : L'action mutuelle des deux électrons contient nécessairement, outre des termes périodiques provenant de leur caractère ponctuel, un terme moyen, comme si chacun d'eux occupait tout le temps chaque élément de son orbite avec une densité proportionnelle à la durée de parcours ; les deux plans d'orbite se repoussent donc comme feraient deux feuilles d'or articulées autour de la ligne d'intersection des plans des orbites.

» S'il n'y a que deux électrons, leurs orbites seront dans des plans rectangulaires et non pas dans le même plan.

» S'il y a trois électrons, leurs orbites, se repoussant le plus possible, formeront un trièdre trirectangle.

» Pour quatre électrons, nous aurons des orbites perpendiculaires aux diagonales d'un cube; c'est la distribution tétraédrique.

» Lorsque le nombre des électrons est un peu grand, le seul fait certain est qu'en raison de leur répulsion mutuelle ils se distribueront dans tout le volume qui entoure le noyau, retenus seulement à distance finie par l'attraction du noyau, contrebalancée par la force centrifuge, au lieu de s'étaler seulement dans un plan suivant les idées primitives de sir Rutherford et de Bohr.

» Mais on ne saurait dire quelle sera la forme de leurs orbites, si chacune d'elles entourera encore le noyau, en différant peu d'une ellipse képlérienne (comme il semble que Bohr continue à le supposer jusque dans ses derniers écrits) ou si c'est seulement l'ensemble des orbites des électrons d'une même couche qui s'étale sur une surface à peu près sphérique, dont chaque orbite n'occupe qu'une calotte peu étendue.

» Pour ma part, c'est cette dernière hypothèse que je regarde comme seule vraisemblable pour les couches un peu riches en électrons.

» Répétons-le : *En raison de la répulsion mutuelle des électrons, l'atome occupe un volume quasi-sphérique.*

IV. L'ATOME A SYMÉTRIE CUBIQUE

» 16° Cette propriété fondamentale, que je crois avoir rendue intuitive, n'est pas nouvelle. Kossel, Lewis, Langmuir ont raisonné, au point de vue de la classification chimique, sur des atomes cubiques ; mais ils supposent les électrons de valence immo-

biles aux sommets d'un cube ; *ce sont des atomes qui ne peuvent pas exister sous les seules actions mécaniques et électriques. En outre, rien ne détermine leurs dimensions.*

» Au contraire, les atomes dont je veux parler maintenant sont, comme celui de Bohr, des atomes dans lesquels *les forces électrostatiques sont tenues en équilibre par les forces centrifuges dues à une circulation rapide, — et dont les dimensions sont fixées par quantification des actions, suivant les préceptes classiques de Sommerfeld.*

» Ils ont le même droit théorique à l'existence permanente que l'atome de Bohr constitué par application de la première règle de quanta. Mais ce sont seulement des édifices à huit ou à quatre électrons ; aucune indication de distribution possible en volume n'a été même ébauchée pour d'autres nombres d'électrons ; c'est la symétrie cubique admise qui a permis de mener à bonne fin la théorie de ces atomes, et de leur champ extérieur ; sans cette symétrie, par laquelle on réduit à trois le nombre des coordonnées variables, le problème général de K électrons à $3K$ coordonnées est inabordable.

» Ce ne sont donc plus des atomes « chimiques » ou « spectroscopiques ». Ils n'ont pas été étudiés au point de vue du rayonnement ; on n'a donc fait usage ni de la seconde règle de Bohr (§ 11), ni de rien d'analogue.

» C'est seulement en vue de la théorie de l'élasticité (et des autres propriétés) des solides, que l'étude de tels édifices électroniques a été faite en 1918-19-20, par M. Born et M. Landé.

» 17° Occupons-nous d'abord de l'atome à huit électrons de Landé. L'hypothèse qui rend les calculs possibles est la suivante :

» Les huit électrons constituent, à chaque instant, un édifice à symétrie cubique. Les coordonnées positives x, y, z de l'électron qui se trouve dans le premier octant des axes suffisent à déterminer toutes les autres, qui, en raison de la symétrie, sont données par le tableau suivant :

$$\begin{array}{ccccccc} x, y, z & . & -x, y, z & . & x, -y, z & . & x, y, -z \\ x, -y, -z & . & -x, y, -z & . & x, -y, z & . & x, -y, -z \end{array}$$

» Les huit électrons sont, à chaque instant, sur une même sphère, ρ .

» Ils se meuvent sous l'influence d'une force centrale attractive provenant du noyau positif, et de leurs répulsions mutuelles. On

écrit facilement le potentiel de ces actions électrostatiques du noyau et des sept autres électrons sur le premier électron, en fonction des seules coordonnées de celui-ci, — (grâce à la symétrie admise) et les trois équations du mouvement. L'intégration de celles-ci n'est possible que par des séries ; deux cas extrêmes sont assez faciles à traiter, et suffisent à renseigner utilement.

» Grâce au mouvement, un tel atome peut exister ; sous l'action des forces électrostatiques, il durerait même indéfiniment, sans qu'on puisse toutefois le qualifier de stable ; car on peut se donner arbitrairement le rayon vecteur dans une position initiale. Les lois de la mécanique et de l'électrostatique ne fixent pas les dimensions de l'atome de Landé, pas plus que celles de l'atome de Bohr ou de notre système planétaire.

» Bien plus : les électrons étant en mouvement non uniforme rayonnent en vertu des lois de Maxwell, extrêmement peu, à la vérité, pendant une période, mais beaucoup en peu de secondes, de sorte que le rayon vecteur moyen devrait, en toute rigueur, diminuer constamment ; le mouvement des électrons, qui assurerait la permanence sous les seules actions électrostatiques, ne fait que ralentir beaucoup la chute des électrons sur le noyau, sans l'empêcher.

» *Comme pour l'atome de Bohr, il faut une règle pour fixer les dimensions des orbites, c'est-à-dire quelques-unes des constantes d'intégration ; et, par le fait qu'elle fixe ces dimensions sous l'influence des seules forces électrostatiques, cette règle implique l'existence de forces, corrigeant ou complétant les lois de Maxwell, de manière à annuler le rayonnement électromagnétique pour les orbites privilégiées qu'elle définit.*

» C'est la règle de *quantification des actions*, sous la forme classique de Sommerfeld, qui achève de déterminer les dimensions de l'atome. Les diamètres possibles sont encore en nombre infini, mais ils forment une suite discontinue, dépendant d'un nombre entier, et l'on adopte la forme la plus stable, c'est-à-dire, la plus concentrée, en vue de la théorie de l'état solide.

» 18° Ces principes généraux étant rappelés, indiquons-en les conséquences.

» Deux cas extrêmes sont faciles à étudier avec une approximation suffisante :

» 1^o La charge (réelle ou virtuelle) du noyau est petite (plus

petite que $8e$) ; les répulsions mutuelles des huit électrons les maintiennent près de leur position moyenne ;

» 2° La charge du noyau est très grande, (beaucoup plus grande que $8e$) ; les trajectoires des électrons dépendent peu (ou rarement) de leur répulsion mutuelle.

» Dans le premier cas, tous les électrons s'écartent extrêmement peu de la surface d'une sphère ; ils décrivent très sensiblement des petits cercles autour des sommets du cube inscrit. Les orbites restent pratiquement circulaires tant que le rayon angulaire des orbites ne dépasse pas une vingtaine de degrés.

» Le rayon de la sphère est alors :

$$\rho_n = a_{H_1} \frac{20,3..n^2}{(N - 2,47..)^2},$$

en appelant a_{H_1} le rayon du premier anneau de l'hydrogène.

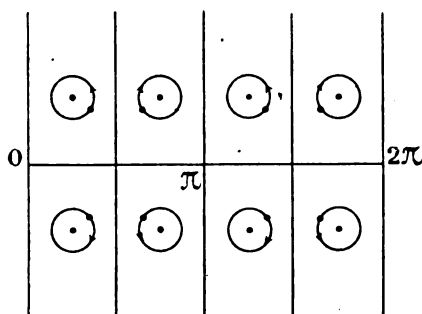


Fig. 2.

Atome à symétrie cubique. Les deux cas extrêmes (Projection de Mercator ; on a marqué dans chaque quadrant les sommets du cube et les orbites).

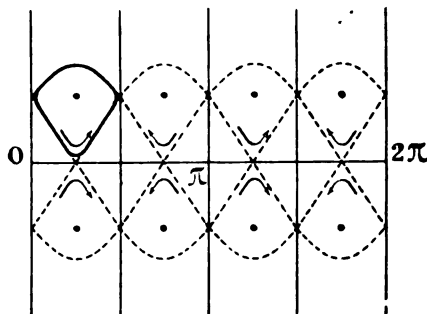


Fig. 3.

» Pour que l'attraction centrale l'emporte sur les répulsions mutuelles, il faut que le nombre atomique dépasse 2,5.. ; pour que l'approximation soit acceptable, il faut que le nombre atomique soit inférieur à 3,3..

» Cette approximation n'est donc acceptable que pour un atome très fortement ionisé négativement ($5e$).

» Si le nombre atomique dépasse 3,3., l'orbite de chaque électron s'ouvre davantage et prend une forme de plus en plus triangulaire, à angles arrondis ; le mouvement de l'électron n'est plus uniforme ; il a des harmoniques 3, 6, 9... de plus en plus importants, à mesure que le nombre atomique croît.

» En même temps, le rayon de la sphère moyenne, dont il ne s'éloigne presque pas, décroît d'abord extrêmement vite ($72 n^2 a_{H_1}$).

pour $N = 3$; environ $8,5 n^2 a_{H_1}$ pour $N = 4$). Enfin, si le nombre atomique est très grand, — atome à forte ionisation positive — l'orbite diffère très peu du triangle sphérique, à côtés de 60° , inscrit dans chaque octant, avec sommets au milieu des côtés de l'octant. Mais ces sommets sont arrondis, par la répulsion intense entre les deux électrons symétriques par rapport au plan de coordonnées.

» Dans ce mouvement, la principale *action* à quantifier est relative au mouvement angulaire presque uniforme du rayon vecteur émané du noyau central ; soit n le nombre correspondant de quanta pour chaque électron ; le rayon ρ_n de la sphère sur laquelle ils restent tous est sensiblement :

$$\rho_n = a_{H_1} \frac{(2n)^2}{N - 3,52..}$$

N étant le nombre atomique, supposé grand. (Ce rayon est un peu plus grand que celui de l'orbite de Bohr à huit électrons et $2n$ quanta).

N	8	10	15	20
$\rho_n : 4 a_{H_1}$	0,9	0,62	0,35	0,24

» 19° S'il n'y a que quatre électrons, la symétrie est *tétraédrique*, les caractères sont les mêmes.

» La première approximation n'est valable que pour un atome à une charge centrale seulement, qui constitue un ion négatif $3e$. Le rayon de la sphère serait :

$$\rho_n = a_{H_1} \frac{(2n)^2 0,69}{(N - 0,92)^2}$$

» Pour l'atome tétraédrique à fort noyau central, chaque électron peut décrire sans choc tout le grand cercle perpendiculaire à une diagonale du cube, avec un rayon :

$$\rho_n = a_{H_1} \frac{n^2}{N - 0,96..}$$

Il est alors fortement ionisé positif $[(N - 4)e]$.

» 20° Sans m'attarder à beaucoup d'autres résultats intéressants des mémoires de M. Landé, je retiendrai seulement ceci :

» On peut imaginer des atomes (neutres ou faiblement ionisés) entourés de toutes parts d'électrons qui circulent en restant très proches de sphères dont le rayon est déterminé par les conditions de quanta. Ces atomes sont permanents.

» Leur champ électrostatique extérieur a des caractères géné-

raux immédiatement visibles, bien qu'il n'ait pas été étudié encore avec une précision suffisante.

» Si l'atome est neutre, son action lointaine est nulle.

» Par symétrie, le moment électrique de l'atome est constamment nul ; le potentiel au loin ne contient pas de terme en $\frac{1}{r^2}$.

» Pour l'atome à symétrie cubique, les termes en $\frac{1}{r^3}$ disparaissent aussi, ainsi que ceux en $\frac{1}{r^4}$; et les premiers qui subsistent sont les termes en $\frac{1}{r^5}$.

» Bien entendu, ces termes ne sont pas isotropes ; ils changent à chaque instant avec la phase des électrons sur leur orbite ; mais ce qui importe, c'est que *leur valeur moyenne n'est pas nulle*.

» En raison de leur distribution ponctuelle, sur une sphère de rayon sensible, les électrons produisent à l'extérieur un champ qui n'est pas exactement compensé par celui d'une charge centrale positive égale, mais qui laisse subsister une action, répulsive sur d'autres électrons, très rapidement croissante quand la distance diminue.

» Deux ions, l'un positif, l'autre négatif, doués d'une constitution de ce genre, exerceront donc l'un sur l'autre une action, attractive au loin en raison de leurs excès de charge, mais répulsive aux petites distances (de l'ordre de 4 ou 5 rayons de la couche électronique) en raison de la prédominance des actions mutuelles des électrons superficiels.

» Il y a une distance (8 à 10 rayons de la couche électronique) à laquelle l'action moyenne de ces deux ions est nulle. C'est une distance d'équilibre. De tels ions peuvent s'associer en grand nombre, de manière à former un édifice cristallin de dimensions déterminées et stable.

» Ils possèdent, en effet, la propriété reconnue nécessaire dès la fin du XVIII^e siècle (1763) par le P. Boscovitch, pour la stabilité de l'état solide ⁽¹⁾ : ils s'attirent au loin et se repoussent à petite distance. C'est la quantification des orbites électroniques qui détermine, indirectement, la distance neutre et, par suite, les dimensions de la maille du réseau cristallin.

(1) Conférences scientifiques de Lord Kelvin (trad. Lugol), p. 313. Gauthier-Villars, 1893.

Voir aussi : Lord KELVIN. *Baltimore Lectures* (oct. 1884), en particulier p. 285 et p. 556 et suiv. London, 1904.

» Pour l'atome neutre, les résultats ne sont certainement pas aussi simples ; mais la discussion n'est pas encore faite.

» Nous voici arrivés à l'extrême limite des connaissances actuelles sur l'atome électrique pur, de dimensions fixées par quantification.

V. LE SOLIDE ÉLECTRIQUE DE BORN

» 21° Dès 1918, le physicien allemand Born, engagé depuis plusieurs années dans l'étude théorique des réseaux de grains électriques, avait adopté, par anticipation, les propriétés générales décrites au numéro précédent de l'atome : ion formé d'un noyau et d'une ceinture d'électrons.

» Les expériences de Bragg avaient appris que le chlorure de potassium et les sels analogues sont formés d'atomes ionisés de chlore et de potassium distribués séparément aux nœuds d'un réseau cubique particulier. Born adopta, pour les atomes ionisés de chlore (—) et de sodium (+), une constitution planétaire de Bohr, (conforme aux calculs de Sommerfeld pour les nombres atomiques des noyaux). Il les supposa distribués conformément aux dispositions indiquées par Bragg, en donnant aux plans des orbites des orientations compatibles avec la symétrie cubique, et chercha quelle est la grandeur absolue théorique du côté de la maille cubique de ce cristal.

» Il importe de montrer les étapes du calcul.

» Ayant choisi la structure et les dimensions de chacun des deux atomes-ions, on doit déterminer son action moyenne sur un atome-ion identique, convenablement orienté, ainsi que sur l'atome-ion de seconde espèce, à toute distance. Il faut alors déterminer l'énergie totale du réseau de Bragg formé par ces grains, en laissant d'abord arbitraire le côté de la maille. Enfin, on cherche la valeur à donner à ce côté pour rendre minimum l'énergie moyenne par grain ; c'est la valeur qui correspond à l'équilibre stable.

» L'organisation des calculs relatifs à toutes les actions mutuelles des différents grains du réseau a été faite de diverses façons par Madelung, par Ewald, par Born. La concordance de leurs résultats numériques est suffisante.

» A la vérité, les recherches dont il s'agit ont été effectuées avant l'étude approfondie de l'atome à symétrie cubique par Landé. Aussi, dans la seconde étape, action mutuelle de deux

atomes-ions, Born a-t-il admis quelques simplifications hypothétiques, mais qui ne peuvent rien changer à l'ordre de grandeur du résultat.

» 22° La constitution indiquée par Bragg est celle de tous les fluorures, chlorures, bromures, iodures de lithium, sodium, potassium, rubidium, césium, dont les volumes moléculaires sont bien connus par des déterminations précises de densités.

» Le nombre d'Avogadro ($6,06 \cdot 10^{23}$), nombre de molécules par molécule-gramme, permet de passer du volume moléculaire à la dimension de la maille.

» On a donc les éléments de comparaison entre les deux valeurs

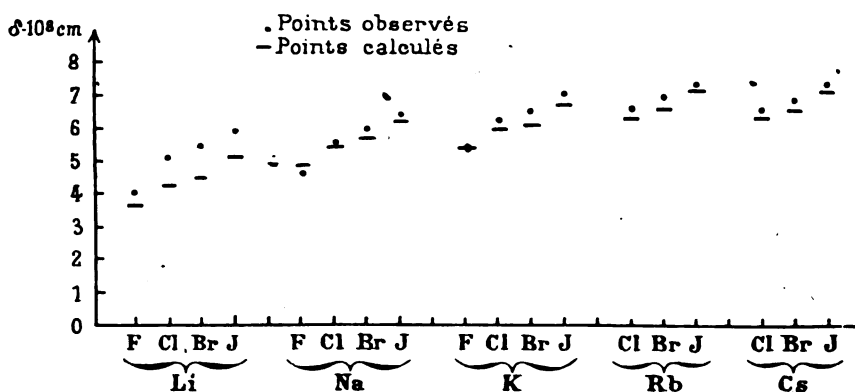


Fig. 4.

de ce côté, l'une directement observée, l'autre déduite, par une longue chaîne de calculs, de la constitution électrique de l'atome de Bohr pour chacune des substances composantes.

» La fig. 4 est extraite de la note de Born et Landé (nov. 1918) à la Société de Physique de Berlin. Les ordonnées représentent le côté du cube élémentaire en *angstroms* (10^{-8} cm).

» Bien que les différences ne soient pas négligeables, l'accord de l'ensemble est tout à fait remarquable, si on réfléchit que les données théoriques sont d'ordre exclusivement électrique. Evidemment, la répulsion théorique a été un peu sous-évaluée ; mais on s'est borné au terme complémentaire en r^{-5} ; les dimensions des orbites externes sont peut-être une fraction assez grande de la distance des noyaux pour que les termes suivants en r^{-7} , r^{-9} , ne soient pas négligeables. D'autre part, les noyaux ont été supposés immobiles, sans agitation thermique, aux nœuds du réseau.

» 23° Encouragé par ce succès, Born a cherché d'autres contrôles ; les compressibilités cubiques de plusieurs de ces sels alcalins ont été déterminées par de belles expériences de Richards ; les coefficients d'élasticité de quelques-uns par W. Woigt et ses élèves. Le calcul théorique de ces coefficients se poursuit sur un plan analogue au précédent.

» Malheureusement, les premiers essais montrèrent que la loi de potentiel $\frac{a}{r} - \frac{b}{r^5}$, d'origine théorique, avec rapport déterminé des coefficients a, b , ne donne pas les compressibilités observées.

» Abandonnant la voie purement théorique, Born a essayé di-

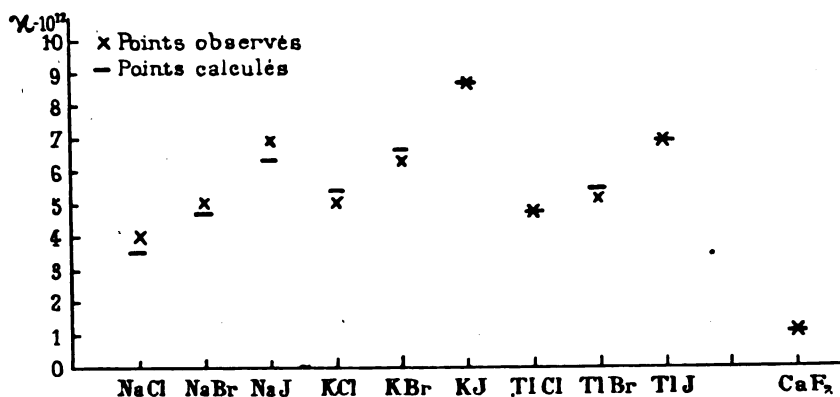


Fig. 5.

vers exposants, au lieu de — 5, pour le terme répulsif, et reconnu qu'une loi de potentiel $\frac{a}{r} - \frac{c}{r^9}$, conduit très sensiblement aux compressibilités cubiques observées, comme le montre la fig. 5.

» Si je cite ce résultat, presque purement empirique, c'est que, peu de temps après, Born a reconnu que l'atome à symétrie cubique, substitué à l'atome planétaire de Bohr, donne la prédominance aux termes en r^{-9} , dans la répulsion de deux atomes. Mais le rapport $\frac{c}{a}$ n'a pas été déterminé théoriquement.

» D'autres essais relatifs aux longueurs d'onde des rayons restants, aux chaleurs de réaction, etc., sont encourageants comme ordre de grandeur, mais trop dépourvus de précision pour être cités ici.

CONCLUSION.

» 24° Il est temps de conclure.

» Bohr et Sommerfeld nous ont appris à construire, avec des éléments exclusivement électriques, noyau et électrons en mouvement quantifié, des atomes de dimensions rigoureusement déterminées, qui, par application de la seconde règle de Bohr, donnent avec une extraordinaire exactitude toutes les particularités de la structure fine des spectres.

» Born et Landé ont montré que, en raison des dimensions finies des orbites — soit dans l'atome planétaire, soit dans l'atome à symétrie cubique — et de la structure ponctuelle des électrons, deux atomes exercent l'un sur l'autre une action répulsive, très rapidement croissante quand la distance des noyaux diminue. Si ces atomes sont ionisés, cette répulsion, associée à l'attraction des ions, fixe une distance d'équilibre — équivalente à une dimension moléculaire.

» Pour les cristaux construits en ions, la grandeur théorique de la maille, ainsi calculée à partir d'éléments exclusivement électriques, est remarquablement proche de la grandeur mesurée directement.

» On peut donc entrevoir le moment où les propriétés élastiques et thermodynamiques des corps pourront être rigoureusement calculées à partir de la constitution électrique des atomes constituants.

» A ce point de vue, les recherches sur les spectres de rayons X et sur les potentiels d'ionisation sont de première importance ; car il y a encore un peu de flottement dans les représentations qu'on se fait de la distribution des électrons en *niveaux* quand ils sont nombreux autour d'un noyau à grand nombre atomique. Le champ extérieur de l'atome dépend plus de cette distribution que le spectre lui-même.

» Malheureusement, nos connaissances sont encore à peu près nulles sur la structure des cristaux à molécules non ionisées ; et, pour la théorie, de ceux-ci, l'attraction entre ions fait défaut. C'est donc tout un domaine actuellement dans le brouillard. Mais au train dont marche la physique depuis un quart de siècle, on peut espérer que notre ignorance ne durera pas longtemps ».

REMARQUES SUR LA COMMUNICATION DE M. BRILLOUIN

M. Alfred LARTIGUE. — « Tout en rendant aux illustres créateurs de la théorie des électrons l'hommage qui leur est dû, il me paraît difficile de me représenter les différents atomes matériels comme réellement constitués par un astre central ou noyau, dans lequel et autour duquel graviteraient un nombre considérable d'électrons satellites. Comment de tels systèmes planétaires parviendraient-ils à s'agencer symétriquement en réseaux cristallins réguliers, d'une très grande variété? Comment expliquer que, pour les électrons négatifs (les seuls qu'on ait jamais réussi à observer isolément), on en distingue selon leur attitude cinq ou six variétés différentes, dont quelques-unes sont caractérisées par une absence de support matériel pouvant à bon droit sembler inexplicable? Enfin, pour rendre compte des raies spectrales obéissant à la formule de Balmer, faut-il vraiment prêter aux électrons l'étrange faculté de sauter brusquement d'une orbite à une autre?

» Frappé de ces difficultés et aussi du fait, constaté par tous les auteurs, qu'un électron en mouvement est non seulement analogue à un élément de courant électrique, mais lui est identique par sa nature même, j'ai proposé en mai 1917 une nouvelle théorie électrique de la matière, où les atomes seraient des *atomes-rotors*, bobinés en forme de cage d'écureuil, avec un nombre N de spires précisément égal aux « nombres atomiques » de sir Ernest Rutherford et de Van den Broek, c'est-à-dire correspondant à la série naturelle des nombres entiers depuis 1 (hydrogène) jusqu'à 92 (uranium).

» J'ai montré comment cette théorie découle naturellement de la loi du très regretté H.-G.-J. Moseley sur la radioactivité induite des corps simples placés à l'anticathode d'un tube de Coolidge ; comment on peut successivement en déduire des formes *polyédriques* variées pour les atomes à l'état solide, des formes *ellipsoïdes* pour les atomes à l'état liquide, des formes *toroïdes* pour les atomes gazeux, et rendre ainsi compte de maintes propriétés importantes.

» Les champions les plus convaincus de la théorie des électrons avouent qu'ils ne savent rien de la véritable structure de ceux-ci. S'ils leur attribuent généralement une forme sphérique, c'est parce

que celle-ci permet des calculs hypothétiques de dimensions, d'espacement, de vitesses, etc. Rien ne s'oppose à ce que la charge d'un électron positif soit répartie tout le long de son orbite, qui devient ainsi un anneau, une *spire*. Rien ne s'oppose à ce que la charge d'un électron négatif corresponde à une certaine quantité d'éther à l'état giratoire (éther liquide), qui peut rester liée à une spire fixe, dont elle constitue le *champ* électromagnétique, et qui peut aussi, en cas de brusque variation du champ suivant l'orientation de la spire, être lancée dans l'espace sous forme de *perturbation* électromagnétique.

» Nous autres, praticiens, nous ne saurions manquer, ce me semble, de concevoir, mieux que des charges électriques discontinues parcourant des orbites concentriques, des courants électriques parcourant des bobinages atomiques à une ou plusieurs couches. Ces bobinages peuvent osciller, d'abord, autour de leur axe de figure (état solide); puis, démarrer et prendre leur vitesse de régime (état liquide); puis, s'emballer et jaillir hors de leurs pseudo-encoches (état gazeux) en projetant parfois au loin, par réaction électrodynamique, quelques spires en court-circuit. On vient de voir MM. Wendt, Ivon et Steinmetz obtenir, à Chicago, la désintégration du tungstène sous l'action d'une puissante décharge électrodynamique ; c'est le mécanisme que je proposais, en mai 1917, pour expliquer la désintégration radioactive, avec son émission de particules matérielles α , accompagnée de radiations électromagnétiques β d'éther liquide et de radiations électrostatiques γ d'éther gazeux ; il explique pareillement les désintégrations atomiques, par bombardement au moyen des particules α , qu'a obtenues, depuis quelques années, sir Ernest Rutherford.

» Nous pouvons aussi admettre aisément que les atomes-rotors qui cristallisent dans un système donné (cubique, quadratique, hexagonal, etc.) aient leurs couches extérieures façonnées suivant une forme correspondante; tel un gâteau de miel est alvéolé en protoprismes bipyramidés. Quant aux propriétés chimiques des atomes, elles dépendront principalement, soit de 1, 2, 3... spires déficitaires, soit de 1, 2, 3... spires restées en excédent, qui se logeront d'elles-mêmes au centre du bobinage, suivant des plans diagonaux appropriés ; ce qui, tout en restant au fond équivalent, est mieux compréhensible que 1, 2, 3... électrons en saillie dans la région extérieure. Les affinités entre atomes différents pourront se

manifester par voie de juxtaposition (combinaisons sans contraction) ou par voie de pénétration concentrique (combinaisons avec contraction).



» L'heure avancée ne me permet pas de faire aujourd'hui un exposé plus détaillé de ma théorie de 1917, qui a d'ailleurs été publiée l'année suivante par la librairie Doin, dans un recueil de « Lettres à l'Académie des Sciences ». Je demanderai seulement la permission de signaler deux résultats des plus encourageants, obtenus depuis cette époque.

» Le premier résultat est relatif à l'explication mécanique des séries de *raies spectrales*. Dans une note à l'Académie des Sciences, présentée par M. Deslandres (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 17 novembre 1919), j'ai fait connaître que leurs formules classiques, dont on sait l'admirable exactitude, peuvent être identiquement remplacées par la subdivision des longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$, caractéristiques des raies spectrales successives, en trois éléments additifs ; ceux-ci découlent, selon une règle arithmétique fort simple, d'une même longueur fondamentale λ_∞ , égale à la limite vers laquelle tend la série considérée (voir tableau annexe I).

» Le second résultat vient d'être trouvé, toujours par l'étude des atomes-rotors déformables, combinée avec la théorie tricinétique générale déjà exposée ici-même, lors de la grande discussion scientifique inaugurée par M. Daniel Berthelot ; il concerne le très gros problème des *chaleurs spécifiques*.

» Désignons par θ la température absolue, et par $q = f(\theta)$ la chaleur massique totale d'un corps simple donné, pris à l'état solide.

» Ainsi que je le disais dans ma communication de décembre 1916, l'agitation thermique doit se décomposer en deux vibrations orthogonales, savoir :

» Une vibration radiale de *pulsation*, se propageant directement par voie d'ébranlement thermique ; elle correspond à la *chaleur sensible* $x\theta$, avec la relation :

$$x\theta = q \cos \varphi ;$$

et une vibration transversale de *rotation-torsion*, se propageant

TABLEAU ANNEXE I

Subdivision, en 3 éléments additifs, des longueurs d'onde caractéristiques des raies spectrales de l'hydrogène.
(Transformation de la formule de Balmer (voir page 329).

Facteurs de $\lambda\infty$	λ Calculés	λ Observés	Facteurs de $\lambda\infty$	λ Calculés	λ Observés
Série ordinaire ($\lambda\infty = 3646$ angstroms)			Série " ζ Poupe " ($\lambda\infty = 3646$ angstroms)		
1 + 1/1 — 1/5	6 562,80	6 562,79	1+1/1,5 — 1/ 5,5	5 413,76	5 413,6
1 + 1/2 — 1/6	4 861,33	4 861,33	1+1/2,5 — 1/ 6,5	4 543,48	4 542,4
1 + 1/3 — 1/7	4 340,48	4 340,47	1+1/3,5 — 1/ 7,5	4 201,58	4 200,7
1 + 1/4 — 1/8	4 101,75	4 101,74	1+1/4,5 — 1/ 8,5	4 027,28	4 026,0
1 + 1/5 — 1/9	3 970,09	3 970,08	1+1/5,5 — 1/ 9,5	3 925,12	3 924,0
1 + 1/6 — 1/10	3 889,07	3 889,05	1+1/6,5 — 1/10,5	3 859,68	3 860,8
1 + 1/7 — 1/11	3 835,41	3 835,51	1+1/7,5 — 1/11,5	3 815,09	3 815,7
1 + 1/8 — 1/12	3 797,92	3 798,00	1+1/8,5 — 1/12,5	3 783,26	3 783,4
1 + 1/9 — 1/13	3 770,65	3 770,73			
1 + 1/10 — 1/14	3 750,17	3 750,27	Série " 4686 " ($\lambda\infty = 2450,10$ angstroms)		
1 + 1/11 — 1/15	3 734,38	3 734,53	1+1,5/1 — 1,5/ 7	4 685,94	4 685,98
1 + 1/12 — 1/16	3 721,96	3 721,98	1+1,5/2 — 1,5/ 8	3 203,28	3 203,30
1 + 1/13 — 1/17	3 711,99	3 712,13	1+1,5/3 — 1,5/ 9	2 733,47	2 733,34
1 + 1/14 — 1/18	3 703,87	3 704,01	1+1,5/4 — 1,5/10	2 511,37	2 511,31
1 + 1/15 — 1/19	3 697,18	3 697,28	1+1,5/5 — 1,5/11	2 385,57	2 385,47
1 + 1/16 — 1/20	3 691,57	3 691,70	1+1,5/6 — 1,5/12	2 306,36	2 306,20
1 + 1/17 — 1/21	3 686,85	3 686,96	1+1,5/7 — 1,5/13	2 252,86	2 252,88
1 + 1/18 — 1/22	3 682,83	3 682,94			
1 + 1/19 — 1/23	3 679,37	3 679,52	Série infra-rouge ($\lambda\infty = 8203,50$ angstroms)		
1 + 1/20 — 1/24	3 676,38	3 676,51	1+1,5/1 — 1,5/ 7	18 750,86	18 751,3
1 + 1/21 — 1/25	3 673,78	3 673,87	1+1,5/2 — 1,5/ 8	12 817,97	12 818,7
1 + 1/22 — 1/26	3 671,50	3 671,53			
1 + 1/23 — 1/27	3 669,48	3 669,55			
1 + 1/24 — 1/28	3 667,71	3 667,83			
1 + 1/25 — 1/29	3 666,12	3 666,25			
1 + 1/26 — 1/30	3 664,70	3 664,74			
1 + 1/27 — 1/31	3 663,43	3 663,55			
1 + 1/28 — 1/32	3 662,27	3 662,36			
1 + 1/29 — 1/33	3 661,24	3 661,31			
1 + 1/30 — 1/34	3 660,29	3 660,47			
1 + 1/31 — 1/35	3 659,44	3 659,88			
1 + 1/32 — 1/36	3 658,66	3 658,80			
1 + 1/33 — 1/37	3 657,94	3 658,19			
1 + 1/34 — 1/38	3 657,29	3 657,40			
1 + 1/35 — 1/39	3 656,68	3 656,80			

**Auteurs des mesures
expérimentales :**

Série ordinaire, de λ_1 à λ_{10} ... Curtis;
de λ_7 à λ_{29} ... Evershed;
de λ_{30} à λ_{35} ... Mitchell;

Série " ζ Poupe "..... Pickering;

Série " 4686 "..... Fowler;

Série infra-rouge..... Paschen.

indirectement par voie d'entraînement inductif ; elle correspond à la *chaleur interne* χ , avec la relation :

$$\chi = q \sin \varphi.$$

Ce qui implique évidemment :

$$q = \sqrt{(\kappa \theta)^2 + \chi^2}.$$

» Or, d'après mes dernières recherches, je suis fondé à croire que l'on doit avoir, pour chacun des corps simples considérés à l'état solide :

$$\kappa = \frac{5,955}{2 N}.$$

» Dans cette forme modernisée de la célèbre loi énoncée en 1819 par Dulong et Petit $\left(\frac{dq}{d\theta} = \frac{6,4 \text{ environ}}{P \text{ atomique}} \right)$,

» N est le nombre atomique, ou nombre de spires de l'atome-rotor ;

» 5,955 est la chaleur atomique théorique à l'état solide, égale à 3 fois la constante R des gaz parfaits ; cette constante, exprimée en calories par degré centigrade, ayant pour valeur 1,985.

» Les données expérimentales sont nombreuses en ce qui concerne les valeurs, aux différentes températures, de la chaleur spécifique totale,

$$q' = \frac{dq}{d\theta}.$$

» Elles font à peu près complètement défaut en ce qui concerne la décomposition de q en chaleur sensible, $\kappa \theta$, et en chaleur interne, χ ; celle-ci semble elle-même normalement composée de deux termes, dont l'un serait constant dans chaque phase allotropique et l'autre, fonction de la température absolue.

» Pour le cuivre, l'argent et divers autres corps simples qui ne manifestent nul symptôme de transformation allotropique, il est permis de présumer que χ soit sensiblement constant, et petit par rapport, à $\kappa \theta$, sauf au voisinage du zéro absolu. Dès lors, la formule de la chaleur massique totale de ces corps simples pris à l'état solide deviendra approximativement :

$$q = \sqrt{\left(\frac{5,955}{2 N} \theta \right)^2 + C^2}.$$

» Cette équation représente une hyperbole, dont le coefficient

TABLEAU ANNEXE II
Chaleurs spécifiques du cuivre, dans l'état solide (voir page 333).

Température absolue θ en degrés	q' calculés (avec $\chi = 15,6$)	q' observés	$q' - q''$
0	$(0,10267^2 \times 0) : 15,6 = 0,00000$	»	»
20	$(0,10267^2 \times 20) : 15,744 = 0,01338$	0,0031	+ 0,010
40	$(0,10267^2 \times 40) : 16,141 = 0,02603$	0,0125	+ 0,014
60	$(0,10267^2 \times 60) : 16,781 = 0,03766$	0,029	+ 0,009
80	$(0,10267^2 \times 80) : 17,630 = 0,04783$	0,047	+ 0,001
100	$(0,10267^2 \times 100) : 18,683 = 0,05639$	0,059	— 0,003
87 à 194	$(25,306 - 17,984) : (194 - 87) = 0,06842$	0,0716	— 0,003
85 à 293	$(33,891 - 17,883) : (293 - 85) = 0,07696$	0,0788	— 0,002
194 à 291	$(33,711 - 25,306) : (291 - 194) = 0,08664$	0,0883	— 0,002
293	$(0,10267^2 \times 293) : 33,891 = 0,09117$	0,0912	$\pm 0,0000$
288 à 373	$(41,355 - 33,435) : (373 - 288) = 0,09317$	0,09305	+ 0,0001
373	$(0,10267^2 \times 373) : 41,355 = 0,09455$	0,0942	+ 0,0004
473	$(0,10267^2 \times 473) : 51,009 = 0,09771$	0,0963	+ 0,0014
573	$(0,10267^2 \times 573) : 60,864 = 0,09919$	0,0985	+ 0,0007
887	$(0,10267^2 \times 887) : 92,393 = 0,10120$	»	»
1357 (fusion)	$(0,10267^2 \times 1357) : 140,19 = 0,10203$	»	»

TABLEAU ANNEXE III
Chaleurs spécifiques de l'argent, dans l'état solide (voir page 333).

Température absolue θ en degrés	q' calculés (avec $\chi = 8,6$)	q' observés	$q' - q''$
0	$(0,06335^2 \times 0) : 8,6 = 0,00000$	»	»
20	$(0,06335^2 \times 20) : 8,693 = 0,00923$	»	»
40	$(0,06335^2 \times 40) : 8,965 = 0,01790$	0,0175	+ 0,0004
60	$(0,06335^2 \times 60) : 9,402 = 0,02560$	0,032	— 0,006
80	$(0,06335^2 \times 80) : 9,982 = 0,03291$	0,040	— 0,007
113	$(0,06335^2 \times 113) : 11,189 = 0,04049$	0,0438	— 0,003
153	$(0,06335^2 \times 153) : 12,958 = 0,04739$	0,0474	$\pm 0,0000$
85 à 293	$(20,457 - 10,146) : (293 - 85) = 0,04957$	0,0510	— 0,0014
194 à 291	$(20,342 - 15,000) : (291 - 194) = 0,05507$	0,0544	+ 0,0007
288 à 373	$(25,145 - 20,169) : (373 - 288) = 0,05854$	0,05625	+ 0,0023
373	$(0,06335^2 \times 373) : 25,145 = 0,05953$	0,0566	+ 0,0029
473	$(0,06335^2 \times 473) : 31,174 = 0,06089$	»	»
289 à 887	$(56,845 - 20,228) : (887 - 289) = 0,06123$	0,0615	— 0,0003
573	$(0,06335^2 \times 573) : 37,385 = 0,06151$	0,0609	+ 0,0006
887	$(0,06335^2 \times 887) : 56,845 = 0,06262$	»	»
1234 (fusion)	$(0,06335^2 \times 1234) : 78,647 = 0,06297$	»	»

angulaire passe de zéro (pour θ nul) à x (pour θ infini), en ayant pour expression générale :

$$q' = \frac{dq}{d\theta} = \left(\frac{5,955}{2N} \right)^2 \frac{\theta}{q} = x \cos \varphi.$$

» La formule ci-dessus permet une comparaison directe entre la théorie et celles des mesures expérimentales par lesquelles on a déterminé pour le cuivre, l'argent, etc., les capacités calorifiques vraies, q'_1 , q'_2 , q'_3 , qui correspondent à certaines températures fixes, θ_1 , θ_2 , θ_3 . J'ai fait faire cette comparaison par mon collaborateur, M. S. Langlois, pour le cuivre, $N = 29$ (voir tableau annexe II), et pour l'argent, $N = 47$ (voir tableau annexe III), en admettant provisoirement :

$$\chi_{Cu} = 15,6 \quad \text{et} \quad \chi_{Ag} = 8,6.$$

» Comme les résultats expérimentaux donnés par M. J. Duclaux, dans le « Recueil de constantes » de MM. Abraham et Sacerdote, portaient sur la capacité calorifique moyenne, $q'_{m,n}$ observable entre deux températures absolues θ_m et θ_n , la valeur moyenne théorique de q' a été calculée par la formule :

$$q'_{m,n} = \frac{q_n - q_m}{\theta_n - \theta_m}.$$

» Sauf aux très basses températures, où les variations de la chaleur interne ne peuvent être tenues pour négligeables, la concordance entre les q' calculés et les q' observés est des plus satisfaisantes.

» Enfin, j'ai obtenu, pour tous les éléments, les valeurs efficaces extrêmes de la chaleur sensible spécifique, dans l'état solide, par la formule :

$$x \cos \varphi = \frac{5,955}{2N} \cos \varphi,$$

en prenant pour $\cos \varphi$ ses limites 0 et 1; et j'ai porté en regard les chaleurs spécifiques totales q' mesurées expérimentalement, ainsi que le classement des corps dans le « Tableau périodique » de Mendelejeff mis sous sa forme la plus moderne, où chacun des groupes 1 à 7 est divisé en deux sous-groupes, A et B (voir tableau annexe IV).

» En examinant ce tableau on constate d'abord que, réserves faites quant au degré de variabilité de la chaleur interne, tous les éléments (écrits en italiques) des sous-groupes B imitent le cui-

TABLEAU ANNEXE IV

Valeurs efficaces extrêmes des chaleurs sensibles spécifiques,
 $\times \cos \varphi$, des corps simples à l'état solide

Chaleurs spécifiques totales, q' , mesurées expérimentalement
 pour les mêmes corps (voir pages 333 et 336).

Éléments	$\times \cos \varphi$	q'
1—7B—Hydrogène H^+	0—2,9775	»
2—0 —Hélium	0—1,4888	»
3—1A—Lithium	0—0,9925	0,52 à 1,09
4—2B—Glucinium	0—0,7444	0,397 à 0,505
5—3B—Bore	0—0,5955	0,071 à 0,357
6—4B—C diamant	0—0,4963	0,000 à 0,441
— C graphite	0—0,4963	0,005 à 0,445
7—5B—Azote	0—0,4254	»
8—6B—Oxygène	0—0,3722	»
9—7B—Fluor	0—0,3308	»
10—0 —Néon	0—0,2978	»
11—1A—Sodium	0—0,2707	0,243 à 0,323
12—2B—Magnésium	0—0,2481	0,189 à 0,248
13—3B—Aluminium	0—0,2290	0,016 à 0,236
14—4B—Silicium	0—0,2127	0,091 à 0,203
15—5B—Phosphore blanc	0—0,1985	0,169 à 0,190
— — rouge	0—0,1985	0,17 à 0,216
16—6B—Soufre cristallisé	0—0,1861	0,035 à 0,181
— — amorphe	0—0,1861	0,22
17—7B—Chlore	0—0,1751	»
18—0 —Argon	0—0,1654	»
19—1A—Potassium	0—0,1567	0,157 à 0,192
20—2A—Calcium	0—0,1489	0,145 à 0,152
21—3A—Scandium	0—0,1418	»
22—4A—Titane	0—0,1353	0,142
23—5A—Vanadium	0—0,1295	0,115
24—6A—Chrome	0—0,1241	0,079 à 0,110
25—7A—Manganèse	0—0,1191	0,093
26—8 —Fer	0—0,1145	0,072 à 0,23
— — (transf.)	0—0,1145	0,31
27—8 —Cobalt	0—0,1103	0,083 à 0,184
— — (transf.)	0—0,1103	0,27
28—8 —Nickel	0—0,1063	0,074 à 0,140
— — (transf.)	0—0,1063	0,15
29—1B—Cuivre	0—0,10267	0,003 à 0,099
30—2B—Zinc	0—0,09925	0,027 à 0,104
31—3B—Gallium	0—0,09605	0,079
32—4B—Germanium	0—0,09305	»
33—5B—Arsenic	0—0,09023	0,070 à 0,086
34—6B—Sélénium	0—0,08757	0,084
35—7B—Brome	0—0,08507	0,070 à 0,084
36—0 —Krypton	0—0,08271	»
37—1A—Rubidium	0—0,08047	»
38—2A—Strontium	0—0,07836	»
39—3A—Yttrium	0—0,07635	»
40—4A—Zirconium	0—0,07444	0,068

Éléments	$\lambda \cos \varphi$	φ'
41—5A—Niobium	0—0,07262	»
42—6A—Molybdène	0—0,07089	0,0554
— — fondu	0—0,07089	0,072
43—7A—?	0—0,06924	»
44—8 —Ruthénium	0—0,06767	»
45—8 —Rhodium	0—0,06617	»
46—8 —Palladium	0—0,06473	0,052 à 0,067
47—1B—Argent	0—0,06335	0,017 à 0,062
48—2B—Cadmium	0—0,06203	0,050 à 0,062
49—3B—Indium	0—0,06076	»
50—4B—Etain blanc	0—0,05955	0,048 à 0,057
— — gris	0—0,05955	0,059
51—5B—Antimoine	0—0,05837	0,046 à 0,054
52—6B—Tellure	0—0,05726	0,047 à 0,049
53—7B—Iode	0—0,05618	0,031 à 0,054
54—0 —Xénon	0—0,05514	»
55—1A—Caesium	0—0,05414	»
56—2A—Baryum	0—0,05317	»
57—3A—Lanthane	0—0,05224	»
58—4A—Cérium	0—0,05134	»
59—» —Praséodyme	0—0,05047	»
60—» —Néodyme	0—0,04963	»
61—» —?	0—0,04881	»
62—» —Samarium	0—0,04802	»
63—» —Europium	0—0,04726	»
64—» —Gadolinium	0—0,04652	»
65—» —Terbium	0—0,04581	»
66—» —Holmium	0—0,04512	»
67—» —Dysprosium	0—0,04444	»
68—» —Erbium	0—0,04379	»
69—» —Thulium	0—0,04315	»
70—» —Néoytterbium	0—0,04254	»
71—» —Lutécium	0—0,04194	»
72—» —Celtium	0—0,04135	»
73—5A—Tantale	0—0,04079	»
74—6A—Tungstène	0—0,04024	0,034
75—7A—?	0—0,03970	»
76—8 —Osmium	0—0,03918	»
77—8 —Iridium	0—0,03867	0,026 à 0,037
78—8 —Platine	0—0,03817	0,026 à 0,037
79—1B—Or	0—0,03769	0,030 à 0,035
80—2B—Mercure	0—0,03722	0,026 à 0,032
81—3B—Thallium	0—0,03676	0,029 à 0,034
82—4B—Plomb	0—0,03631	0,012 à 0,034
83—5B—Bismuth	0—0,03587	0,028 à 0,030
84—6B—Polonium (?)	0—0,03545	»
85—7B—?	0—0,03503	»
86—0 —?	0—0,03462	»
87—1A—Niton (?)	0—0,03422	»
88—2A—Radium	0—0,03384	»
89—3A—Actinium	0—0,03345	»
90—4A—Thorium	0—0,03308	»
91—5A—Brevium (?)	0—0,03272	»
92—6A—Uranium	0—0,03236	»

vre et l'argent. Plus ils se rapprochent de leur point de fusion, plus leur chaleur spécifique totale avoisine la limite théorique de la chaleur sensible spécifique ; elle ne dépasse quelque peu cette limite que dans le cas de l'aluminium 13 (1 mesure), du phosphore rouge 15, du soufre amorphe 16 et du zinc 30 (1 mesure).

» Il en est autrement pour d'assez nombreux éléments des sous-groupes A. Des dépassements très nets de la chaleur spécifique totale, au delà de la limite théorique de la chaleur sensible spécifique, se manifestent pour tous les éléments du sous-group : 1 A (lithium 3, sodium 11, potassium 19).

» Des dépassements encore plus élevés sont ceux des éléments ferromagnétiques du groupe 8 (qui n'a pas de sous-groupes), savoir : fer 26, cobalt 27, nickel 28; tandis que le palladium 46, et surtout l'iridium 77, ainsi que le platine 78, semblent se comporter comme les éléments appartenant aux sous-groupes B.

» En raison de la difficulté manifeste d'effectuer des mesures directes de la chaleur interne, il est probable que celle-ci devra être électrotechniquement déterminée par le calcul des atomes-rotors déformables, avec caractéristiques en court-circuit, et avec diagrammes vectoriels semblables à ceux que MM. Blondel, Potier, Steinmetz, etc., ont fait connaître, et qui sont d'usage courant pour les machines électriques non déformables. »

M. le PRÉSIDENT remercie MM. Brillouin et Lartigue.

La séance est levée à 23 heures 10.



IL Y A TRENTE ANS

Du rapport des divers conducteurs électriques (M. F. Géraldy). — Expériences avec les courants alternatifs de grande fréquence et de haute tension (suite et fin) M. Tesla.

Le Gérant : J. GUYOT.

IMP. HENRIOT - 30, RUE GENGHET, PARIS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 5 juillet 1922 : Admission d'un membre titulaire, p. 337. — Membres décédés, p. 338. — Dons à l'Ecole, p. 338. — Autobus électriques à trolley, dits « trolleybus » (M. IGLÉSI), p. 339. — L'omnibus à double trolley étudié par la Société des Transports en Commun de la Région parisienne (M. PÉRIDIER), p. 379. — Les transmissions électriques dans les engins de guerre (tanks, locomotives pétroléoélectriques) (M. DUTILH), p. 389.

IL Y A TRENTE ANS, p. 408.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 5 juillet 1922. (1)

Présidence de M. M. BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné lecture de la demande d'admission suivante :

M. Charruau (Marcel-Henri-Pierre), Ingénieur au Bureau Véritas, 31, rue d'Offemont, à Paris (17^e). — Présenté par MM. P. Janet et Ch. David.

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Ce candidat est élu membre titulaire de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Marcel Clerc, E. Pinet, L. Seguin*. Il adresse aux familles de ces membres ses condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part du don suivant:

Ecole :

Maison J. Carpentier, réparation d'un ohmmètre à magnéto indépendante.

Il adresse à ce donateur les remerciements de la Société.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

LES AUTOBUS ÉLECTRIQUES À TROLLEY, DITS "TROLLEYBUS"

Les autobus à trolley prennent à l'heure actuelle un développement important, car ils répondent dans beaucoup de cas à la solution la plus économique des problèmes de transport en commun.

Dans son exposé, l'auteur établit le bilan comparatif des dépenses afférentes aux différents systèmes de traction et définit, suivant la fréquence des départs et le prix d'achat de l'énergie, la zone économique d'emploi des trolleybus.

Une étude descriptive des différents systèmes complète cette documentation.

M. IGLÉSIS. — « La nécessité de développer de plus en plus les moyens de transport en commun, pour répondre aux exigences de la vie moderne, a conduit les exploitants à adapter les différents modes de locomotion aux conditions économiques du trafic à assurer.

» C'est ainsi que, suivant l'importance des besoins, on est amené à envisager, soit l'installation d'un service de traction sur rails, soit l'organisation d'un service automobile sur route.

» Dans le cas des tramways urbains et suburbains et des chemins de fer à trafic intense, la traction électrique est de plus en plus et presque exclusivement employée. L'expérience a montré que c'est ce mode de traction qui correspond au minimum de frais d'exploitation, dès que le trafic est suffisant pour justifier l'amortissement des dépenses de premier établissement de la voie, de la ligne de prise de courant et des usines ou sous-stations d'alimentation.

» Lorsque l'importance du trafic d'une ligne de transport en commun suburbaine ou interurbaine n'est plus suffisante pour couvrir les frais d'exploitation et l'amortissement des dépenses nécessitées par l'établissement d'une ligne de tramway, on a recours, dans ce cas, à la traction par autobus sur route en utilisant généralement un moteur à explosion comme système propulseur.

» Entre les tramways électriques sur rails et les autobus à essence, il existe un autre système de traction électrique sur route qui s'intercale, au point de vue économique, entre ces deux modes de locomotion, et permet de résoudre, dans les circonstances actuelles, un grand nombre de problèmes de transports en commun.

» Comme système d'autobus électrique sur route, on peut utiliser soit des véhicules à accumulateurs appelés généralement « électrobus », soit des véhicules à trolley dits « trolleybus ».

» Les électrobus à accumulateurs emportent avec eux leur

source d'énergie et ne peuvent assurer qu'un trajet limité, tandis que les trolleybus, qui reçoivent leur énergie d'une usine génératrice, par l'intermédiaire de lignes aériennes de prise de courant, peuvent, de ce fait, assurer un trafic quelconque.

» Nous nous proposons, au cours de la présente communication, d'étudier, au point de vue économique, les conditions d'emploi des trolleybus, et de décrire succinctement les organes caractéristiques qui les constituent.

» Ce mode de locomotion qui a pris, ces derniers temps, un développement important, principalement à l'étranger, commence également à s'introduire en France.

PREMIERE PARTIE

Etude économique d'un problème de transports en commun.

» L'étude économique de tout projet de transport en commun conduit à envisager, pour définir le choix du système, la valeur respective des trois facteurs qui interviennent dans le budget de l'exploitation, et qui sont :

- » a) Les charges fixes;
- » b) Les dépenses d'entretien;
- » c) Les dépenses de traction.

» C'est précisément la comparaison de ces différents facteurs, en regard du trafic prévu, qui peut guider l'exploitant dans le choix du système de traction à adopter.

» Nous allons essayer de déterminer la valeur de chacun de ces facteurs, en considérant les trois systèmes principaux de traction :

- » 1° Tramways électriques sur rails ;
- » 2° Autobus électriques à trolley ;
- » 3° Autobus à essence.

» a) *Charges fixes.* — Pour tenir compte des charges fixes, il faut définir le capital immobilisé comme premier établissement et fixer les taux d'amortissement et d'intérêt de chaque poste.

» Dans l'étude économique comparative ci-dessous, nous ne considérerons, parmi les dépenses de premier établissement, que celles qui sont susceptibles de varier, d'après le système de traction choisi. Soient :

- » *L*, la longueur de la ligne à desservir ;

- » N , le nombre total de voitures-kilomètres par an ;
- » n , le nombre de véhicules nécessaires ;
- » A , le prix de revient kilométrique de la ligne ;
- » B , le prix unitaire des véhicules ;
- » t , le taux d'intérêt et d'amortissement de la ligne ;
- » t' , le taux d'intérêt et d'amortissement des véhicules.

» Dans l'étude ci-après, nous affecterons ces valeurs des indices 1, 2 et 3 suivant qu'il s'agit de tramways, de trolleybus ou d'autobus.

» Les charges fixes, intérêts et amortissement, de la ligne (rails, lignes de contact, sous-stations) et des véhicules, sont égales à :

- » 1° *Tramways électriques* :

$$A_1 L t_1 + n B_1 t'_1 ;$$

- » 2° *Trolleybus* :

$$A_2 L t_2 + n B_2 t'_2 ;$$

- » 3° *Autobus à essence* :

$$n B_3 t'_3$$

» b) *Dépenses d'entretien*. — Les dépenses d'entretien sont généralement rapportées, dans les bilans d'exploitation, au nombre annuel de voitures-kilomètres. Soient :

» a , le prix d'entretien annuel de la ligne par voiture-kilomètre ;

» b , le prix d'entretien annuel des véhicules par voiture-kilomètre.

» Les dépenses annuelles d'entretien suivant le mode de traction adopté seront celles désignées ci-dessous :

- » 1° *Tramways électriques* :

$$N (a_1 + b_1)$$

- » 2° *Trolleybus* :

$$N (a_2 + b_2)$$

- » 3° *Autobus* :

$$N b_3$$

» c) *Dépenses de traction*. — Parmi les dépenses d'exploitation, nous n'examinerons ici que les dépenses de traction qui sont susceptibles de varier d'après le système choisi, c'est-à-dire que nous ne comparerons seulement que les dépenses d'énergie.

» Soient :

» c , la consommation spécifique, en kilowatts-heure par voiture-kilomètre ;

» p_1 , le prix de revient du kilowatt-heure de l'énergie électrique ;

» c_3 , la consommation spécifique, en litres d'essence par voiture kilomètre ;

» p_3 , le prix de revient du litre d'essence.

» On aura comme dépense d'énergie :

» 1° Pour les tramways : Nc_1p_1 ;

» 2° Pour les trolleybus : Nc_2p_2 ;

» 3° Pour les autobus : Nc_3p_3 .

BILAN ÉCONOMIQUE.

» Le bilan économique comparatif des dépenses afférentes aux systèmes de traction s'établit en totalisant les 3 facteurs définis ci-dessus.

» On aura donc :

» 1° Pour les tramways :

$$A_1 L t_1 + n B_1 t'_1 + N(a_1 + b_1 + c_1 p_1); \quad (1)$$

» 2° Pour les trolleybus :

$$A_2 L t_2 + n B_2 t'_2 + N(a_2 + b_2 + c_2 p_1); \quad (2)$$

» 3° Pour les autobus :

$$n B_3 t'_3 + N(b_3 + c_3 p_3). \quad (3)$$

» L'étude économique d'un problème de transport en commun se ramène donc à rendre minimum l'expression générale :

$$\alpha L + \beta n + \gamma N.$$

» Les deux premiers termes sont faciles à chiffrer. Le dernier mérite d'être étudié à fond, car il comprend la dépense de traction, qui est variable pour chaque système et que nous allons préciser ci-après :

DÉTERMINATION DES DÉPENSES DE TRACTION.

» En appelant :

» π , le poids total du véhicule ;

» f , l'effort de traction, en kilogramme par tonne ;

» ρ , le rendement total jusqu'à la jante du véhicule,

la dépense d'énergie par voiture-kilomètre et pour marche continue en palier sera égale à :

» 1° Pour les tramways électriques :

$$C_1 = \frac{\pi_1 \times f_1 \times 1\,000 \times 9,81 \times p_1}{\rho_1 \times 3\,600 \times 1\,000} = \frac{2,72 \times \pi_1 \times f_1}{1\,000 \times \rho_1} \text{ en kw-h.}$$

» Pour fixer les idées, considérons un tramway léger de 35 places pesant en charge 7,500 tonnes. Adoptons 7,5 pour valeur de f_1 et 0,63 pour valeur de ρ_1 , (soit 0,87 pour le rendement du moteur, 0,85 pour le rendement du châssis et 0,85 pour le rendement de la ligne).

» On aura dans ces conditions :

$$C_1 = \frac{2,72 \times 7,5 \times 7,5}{1\,000 \times 0,63} = 0,242 \text{ kw-h;} \quad (4)$$

» 2° Pour les trolleybus :

$$C_2 = \frac{\pi_2 \times f_2 \times 1\,000 \times 9,81}{\rho_2 \times 3\,600 \times 1\,000} = \frac{2,72 \times \pi_2 \times f_2}{1\,000 \times \rho_2} \text{ kw-h.}$$

» Pour le même nombre de places, on peut estimer le poids du trolleybus en charge égal à 6 tonnes, car le châssis est plus léger et le moteur également, du fait qu'il tourne plus vite.

» Adoptons pour f_2 , 30 kilogrammes par tonne et pour ρ_2 , la valeur 0,63 définie ci-dessus.

» On aura dans ces conditions :

$$C_2 = \frac{2,72 \times 6 \times 30}{1\,000 \times 0,63} = 0,777 \text{ kw-h.} \quad (5)$$

» 3° Pour les autobus :

$$C_3 = \frac{\pi_3 \times f_3 \times 1\,000 \times c_0}{\rho_3 \times 75 \times 3\,600} = \frac{\pi_3 \times f_3 \times a_0}{270 \times \rho_3}.$$

» Dans les mêmes conditions que ci-dessus, on peut donner à π_3 la valeur de 5,500 tonnes en conservant pour f_3 , 30 kilogrammes par tonne comme pour les trolleybus :

« ρ_3 = 0,85 (rendement mécanique entre la jante et l'arbre moteur ;

» c_0 , la consommation spécifique en palier, est de l'ordre de 250 à 300 grammes d'essence de 700 de densité par cheval-heure, soit 0,4 litre par cheval-heure.

» Ce qui donne :

$$C_3 = \frac{5,5 \times 30 \times 0,4 \times p_3}{270 \times 0,85} = 0,287 \text{ litre d'essence.} \quad (6)$$

» Nous venons de définir ci-dessus la dépense d'énergie par voiture-kilomètre en palier pour marche continue. En fait, dans un service normal, il faut tenir compte en plus, de la dépense supplémentaire d'énergie pour les rampes, les courbes et les démarrages.

» Les chiffres réels d'exploitation sont donc notablement plus élevés, mais, comme il s'agit ici d'une comparaison entre les trois systèmes de traction, nous admettrons que cette dépense supplémentaire d'énergie par voiture-kilomètre, pour les tramways et pour les autobus, a la même valeur que la consommation en palier, et pour les trolleybus nous adopterons, proportionnellement au poids, la même augmentation que pour les tramways, ce qui nous donnera ainsi la consommation spécifique en kilowatts-heure par voiture-kilomètre pour les tramways et pour les trolleybus, et en litres d'essence pour les autobus.

» $c_1 = 0,242 + 0,242 = 0,484$ kilowatts-heure ;

» $c_2 = 0,777 + \frac{0,242 \times 6}{7,5} = 0,97$ kilowatts-heure ;

» $c_3 = 0,287 + 0,287 = 0,57$ litres.

» Ces valeurs correspondent sensiblement à la réalité, puisque pour les tramways on arrive, en moyenne, à une consommation spécifique de 60 watts-heure par tonne kilomètre ; pour les trolleybus, 125 à 150 watts-heure par tonne-kilomètre, et pour les autobus à essence de 35 places : 50 litres d'essence et 6 litres d'huile aux 100 km.

» En multipliant la consommation spécifique par le prix unitaire de l'énergie, on aura ainsi la dépense de traction afférente à chaque système.

» En comparant les résultats établis ci-dessus et en tenant compte que p_e , prix du litre d'essence, est de l'ordre de 1,50 fr, et p_k , prix du kilowatt-heure, de l'ordre de 0,30 fr, nous pouvons déjà conclure que :

» Le tramway correspond aux dépenses d'amortissement les plus élevées ; par contre, ses dépenses de traction et d'entretien sont les plus réduites ;

» Le trolleybus a des dépenses d'amortissement de ligne bien plus faibles que le tramway et des dépenses de traction comprises entre celles du tramway et celles de l'autobus ;

» L'autobus n'a aucune dépense d'amortissement de ligne à as-

sumer, mais, par contre, ses dépenses de traction et d'entretien sont les plus élevées.

COMPARAISON AU POINT DE VUE ÉCONOMIQUE DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE TRACTION

» Pour mieux préciser les conditions économiques d'emploi des différents systèmes de traction, en vue de fixer le choix sur le système qui répond le mieux aux exigences économiques du problème, nous allons étudier comparativement les dépenses de chacun des systèmes en présence, d'après le trafic à assurer.

» Reprenons l'expression générale :

$$\alpha L + \beta n + \gamma N, \quad (7)$$

dans laquelle nous introduirons une nouvelle valeur plus commode, qui est la *fréquence journalière des départs*, que nous désignerons par F .

» On peut exprimer la valeur de N en fonction de F et de L ; on a, en effet, la relation :

$$N = F \times 2 L \times 365.$$

» De même, si l'on désigne par m , la moyenne journalière de parcours kilométrique par voiture, qui est de l'ordre de 80 à 100 kilomètres, on peut écrire :

$$n = \frac{F \times 2 L}{m}.$$

» L'expression générale (7) devient alors :

$$L \left(\alpha + \beta \frac{2 F}{m} + 730 \gamma F \right).$$

» La comparaison économique des différents systèmes de traction revient, en définitive, à déterminer le nombre de voyages par jour, F , qui fournit l'égalité des dépenses pour deux systèmes de traction que l'on veut comparer.

» Appelons : F' , la fréquence journalière des départs, qui donne l'égalité des dépenses pour les trolleybus et pour les tramways.

» F'' , la fréquence journalière des départs, qui donne l'égalité des dépenses pour les trolleybus et pour les autobus.

» On obtient ainsi les équations :

» a) L'égalité des dépenses entre les tramways et les trolleybus a lieu lorsque :

$$\alpha_1 + \beta_1 \frac{2F''}{m} + 730 \gamma_1 F'' = \alpha_2 + \beta_2 \frac{2F''}{m} + 730 \gamma_2 F'',$$

d'où l'on tire la valeur de F'' .

$$F'' = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\frac{2(\beta_2 - \beta_1)}{m} + 730(\gamma_2 - \gamma_1)}; \quad (9)$$

» b) L'égalité des dépenses entre les trolleybus et les autobus a lieu lorsque :

$$\alpha_2 + \beta_2 \frac{2F''}{m} + 730 \gamma_2 F'' = \beta_3 \frac{2F''}{m} + 730 \gamma_3 F''. \quad (10)$$

» En introduisant dans ces formules les valeurs définies précédemment :

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_1 t_1, & \beta_1 &= B_1 t'_1, \\ \alpha_2 &= A_2 t_2, & \beta_2 &= B_2 t'_2, \\ & & \beta_3 &= B_3 t'_3, \\ \gamma_1 &= a_1 + b_1 + c_1 p_1 = a_1 + b_1 + 0,48 p_1, \\ \gamma_2 &= a_2 + b_2 + c_2 p_1 = a_2 + b_2 + 0,97 p_1, \\ \gamma_3 &= b_3 + c_3 p_3 = b_3 + 0,57 p_3, \end{aligned}$$

on obtient :

a) Pour l'égalité des dépenses tramways-trolleybus :

$$F'' = \frac{A_1 t_1 - A_2 t_2}{\frac{2(B_2 t'_2 - B_1 t'_1)}{m} + 730(a_2 - a_1 + b_2 - b_1 + 0,49 p_1)}; \quad (11)$$

b) Pour l'égalité des dépenses autobus-trolleybus :

$$F'' = \frac{A_2 t_2}{\frac{2(B_3 t'_3 - B_2 t'_2)}{m} + 730(b_3 - (b_2 + a_2) + 0,574 p_3 - 0,97 p_1)}. \quad (12)$$

» Pour fixer les idées, nous allons appliquer, aux différents termes entrant dans les formules (11) et (12) ci-dessus, des valeurs numériques relevées comme moyennes dans différentes exploitations de province.

» Nous négligerons, pour simplifier, les termes en $B t'$ — en fait, on devrait tenir compte que, si les prix des différents véhicules sont du même ordre, à capacité égale, par contre, les autobus doivent être amortis beaucoup plus rapidement que les trolleybus ou les tramways (10 ans au lieu de 15 ans).

» Prix d'établissement kilométrique d'une ligne de tramway à voie simple (voie, ligne et sous-stations) :

$$A_1 = 200\ 000 \text{ fr.}$$

» Prix d'établissement kilométrique d'une ligne de trolleybus (ligne et sous-stations) :

$$A_2 = 40\ 000 \text{ fr.}$$

» Taux d'intérêt et amortissement d'une ligne de tramway ou d'une ligne de trolleybus :

$$t_1 = t_2 = 8,5 \text{ pour } 100.$$

» Frais d'entretien, par voiture-kilomètre, de la ligne aérienne et de la voie du tramway :

$$a_1 = 0,11 \text{ fr.}$$

» Frais d'entretien, par voiture-kilomètre, de la ligne aérienne du trolleybus :

$$a_2 = 0,04 \text{ fr.}$$

» Frais d'entretien, par voiture-kilomètre, pour un tramway :

$$b_1 = 0,16 \text{ fr.}$$

» Frais d'entretien, par voiture-kilomètre, de la ligne aérienne (bandages compris) :

$$b_2 = 0,29 \text{ fr.}$$

» Frais d'entretien, par voiture-kilomètre, pour un autobus :

$$b_3 = 0,46 \text{ fr.}$$

» Nous considérerons comme variables le prix d'achat p_3 du litre d'essence et le prix d'achat p_1 du kilowatt-heure.

» Dans ces conditions, les équations générales comparatives deviennent, en développant :

$$F'' = \frac{18,63}{0,06 + 0,49p_1}$$

$$F' = \frac{4,685}{0,13 + 0,57p_3 - 0,97p_1}$$

» Les résultats en fonction de p_1 et p_3 sont consignés dans le tableau ci-après.

» Pour des valeurs différentes des frais de premier établissement et des dépenses d'entretien, il suffira d'appliquer les formules (11) et (12) pour déterminer, dans chaque cas particulier, la zone d'utilisation économique des trolleybus.

Tramways-Trolleybus		Trolleybus-Autobus		
p_1	F''	p_1	p_3	F''
0	310	0	2	3,7
			1,50	4,8
			1,00	6,7
			0,50	11,2
0,05	222	0,10	2	4,05
0,10	1,50		5,3	
	1,00		7,8	
	0,50		14,8	
0,15	140	0,20	2	4,3
0,20	1,50		5,9	
	1,00		9,25	
	0,50		21,3	
0,25	101	0,30	2	4,8
0,30	1,50		6,7	
	1,00		11,5	
	0,50		37,7	
0,35	80,6	0,40	2	5,3
0,40	1,50		7,8	
	1,00		15	
	0,50		173	
0,45	66	0,50	2	5,95
0,50	1,50		9,37	
	1,00		21,8	
	0,50		»	
0,55	56,4	0,60	2	6,8
0,60	1,50		11,65	
	1		39,8	
	0,50		»	
0,65	48,6	0,70	2	7,9
0,70	1,50		15,3	
	1		223	
	0,50		»	
0,75	43,6	0,80	2	9,45
0,80	1,50		22,4	
	1		»	
	0,50		»	
0,85	38,8	0,90	2	11,9
0,90	1,50		41,5	
	1		»	
	0,50		»	
0,95	35,4	1	2	15,65
1	1,50		312	
	1		»	
	0,50		»	

» Les résultats ci-dessus obtenus permettent d'établir les cour-

les qui délimitent les frontières économiques du trolleybus par rapport à l'autobus et au tramway.

» Le point de rencontre des deux courbes de F' et F'' s'obtient par la relation :

$$\frac{18,63}{0,06 + 0,49 p_1} = \frac{4,685}{0,13 + 0,57 p_3 - 0,97 p_1},$$

ce qui donne, en simplifiant, $p_1 = 0,11 + 0,548 p_3$.

» Le diagramme de la figure 1 traduit graphiquement les résultats obtenus par l'application des formules établies précédemment et permet de délimiter la zone économique d'application

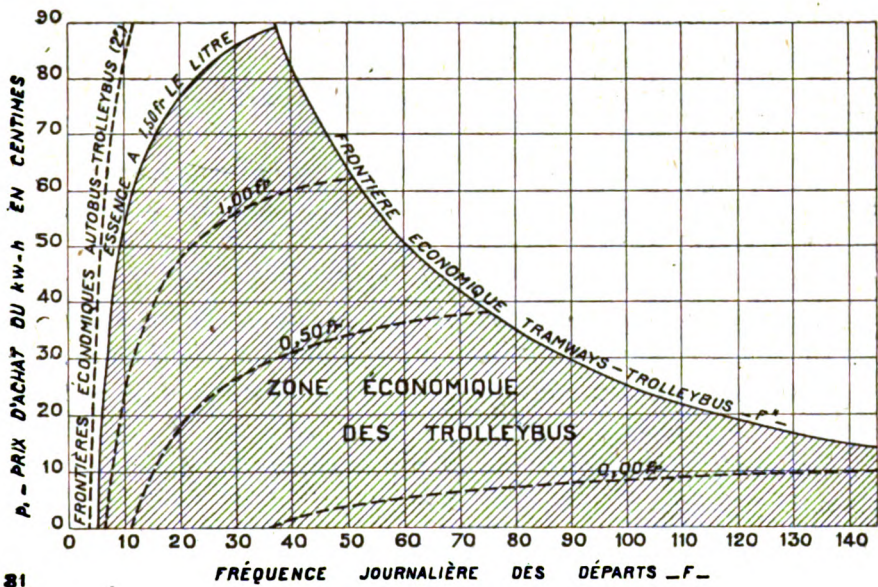


Fig. 1. — Diagramme économique.

des trolleybus en fonction de la fréquence des départs et du prix d'achat de l'énergie.

» On voit qu'avec le cours actuel de l'essence, qui est de l'ordre de 1,50 fr le litre, et le prix moyen de l'énergie électrique pour traction, variable suivant les régions, mais qui est de l'ordre de 0,30 fr le kilowatt-heure, le trolleybus s'impose pour des fréquences journalières de départs comprises entre 6 et 90, ce qui correspond à un grand nombre de problèmes de transports en commun.

» Avec les chiffres envisagés ci-dessus et en comptant une durée du service de 12 heures par jour, on peut dire que le trolleybus

est le moyen de transport le plus économique dès que les intervalles de départ sont espacés de plus de 8 minutes et de moins de 2 heures.

» La limite d'emploi des tramways serait encore plus faible si l'on envisageait le prix d'établissement d'une ligne à voie double.

» En introduisant dans les formules générales précédentes les valeurs locales de premier établissement, d'entretien et d'achat de l'énergie, on pourra facilement préciser les avantages de tel système de traction qui s'appropriera le mieux au trafic prévu.

» Si, au début, ce trafic est indéterminé, l'exploitant pourra le sonder en organisant d'abord un service d'autobus, puis passer au trolleybus lorsque le trafic deviendra suffisant et, enfin, s'il dépasse la frontière économique, installer une ligne de tramways en utilisant la ligne aérienne de prise de courant et les sous-stations d'alimentation.

» Ces conditions pourront se présenter dans beaucoup de cas, car il est un fait d'expérience qui montre que les facilités de transport créent le trafic.

» Par contre, lorsqu'une ligne de tramways est insuffisamment rémunératrice, il pourra être intéressant pour l'exploitant, au lieu de remplacer des rails usés, d'installer à la place un service par trolleybus, tout en conservant la partie principale de la ligne aérienne de prise de courant.

» Un cas analogue vient de se produire récemment à Birmingham.

DEUXIEME PARTIE

Description des différents systèmes de trolleybus.

» Nous allons passer rapidement en revue, dans cette deuxième partie de notre étude, l'examen des différents organes particuliers qui composent les châssis des trolleybus.

CHASSIS

» Au point de vue mécanique, les châssis des trolleybus sont analogues aux châssis bien connus des autobus à essence. Ils n'en diffèrent que par la substitution au moteur à explosion, à l'embranchement et au changement de vitesse, d'un ou plusieurs moteurs électriques commandés à l'aide d'un contrôleur.

» Dans la plupart des trolleybus actuels, les roues avant sont directrices et les roues arrière motrices ; les châssis, suivant les applications, sont équipés avec un seul ou deux moteurs.

» La démultiplication entre les moteurs et les roues est de l'ordre de $1/12$ pour les commandes par vis sans fin.

» Dans le châssis à simple moteur, les roues arrière sont commandées par l'intermédiaire, soit d'un système de vis sans fin, comme dans un grand nombre de trolleybus et d'autobus anglais, soit par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenages coniques et d'un jeu d'engrenages cylindriques, comme dans certains autobus à essence.

» Dans le cas de châssis à simple moteur ou à double moteur

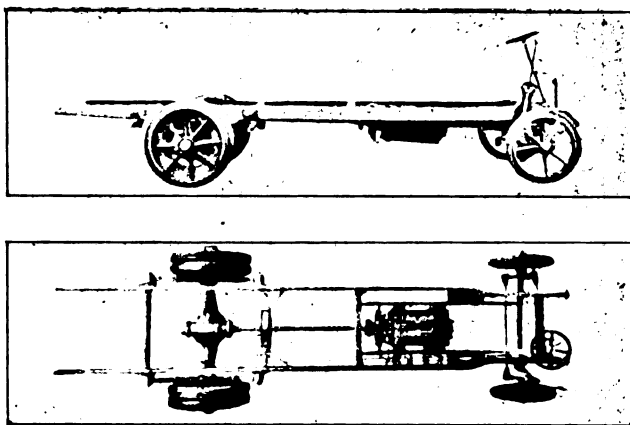


Fig. 2. — Châssis Railless à simple moteur

en tandem, un différentiel est interposé entre les deux roues pour faciliter les virages.

» La figure 2 représente les photographies en élévation et en plan d'un châssis Railless, des Constructions électriques de France, pouvant supporter une carrosserie de 35 à 40 places, et équipé d'un moteur de 42 chevaux commandant l'essieu arrière par l'intermédiaire d'une vis sans fin.

» Dans le cas de châssis à deux moteurs, on peut disposer les deux moteurs en tandem comme le font certains constructeurs américains ou les disposer parallèlement, chaque moteur attaquant les roues correspondantes, ce qui permet de supprimer ainsi le différentiel.

» La figure 3 représente la vue en plan d'un châssis Railless,

des Constructions électriques de France, à deux moteurs avec commande par vis sans fin.

» Il est à signaler que la vis sans fin est appliquée sur une très grande échelle, principalement en Angleterre où la majorité des autobus et des trolleybus en sont munis.

» En France, au contraire, certains constructeurs préfèrent la double démultiplication par couple cône et cylindrique.

» Au cours d'un récent voyage en Angleterre, on nous a indiqué de différentes sources que le rendement des vis sans fin était de l'ordre de 90 pour 100 et que les frais d'entretien étaient

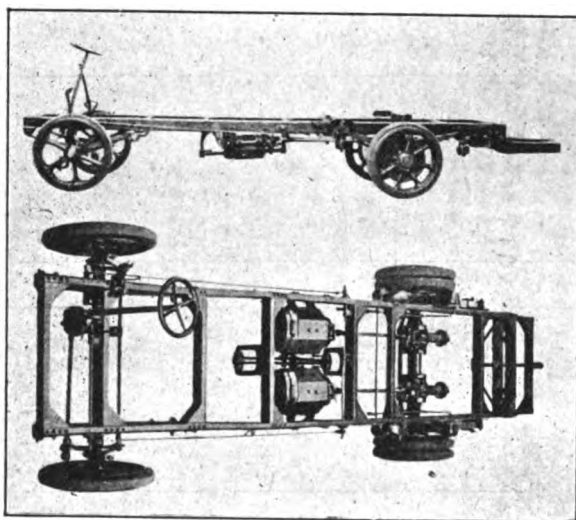


Fig. 3. — Châssis Railless à deux moteurs.

très réduits, ce qui justifierait la faveur dont ce système de transmission jouit en Angleterre.

» Le choix d'un châssis à simple moteur ou d'un châssis à deux moteurs dépend des conditions d'utilisation, du prix de l'énergie électrique et du profil de la route.

» Le châssis à simple moteur est mécaniquement plus simple et son prix de revient est plus réduit ; son emploi est tout indiqué dans les régions où le prix d'achat du kilowatt-heure est faible, où les arrêts sont peu fréquents et où les rampes ne sont pas très importantes.

» Avec le châssis à simple moteur, la régulation de la vitesse ne pouvant se faire pour une grande partie que par les résis-

tances de démarrage, il s'ensuit à chaque ralentissement une consommation d'énergie dissipée en pure perte, qui *devient assez importante* lorsque les arrêts ou les ralentissements sont très fréquents.

» Dans le cas du double moteur, au contraire, comme le contrôle série-parallèle permet d'obtenir deux régimes de vitesse économique, on aurait, à 1/2 vitesse, un rendement du même or-

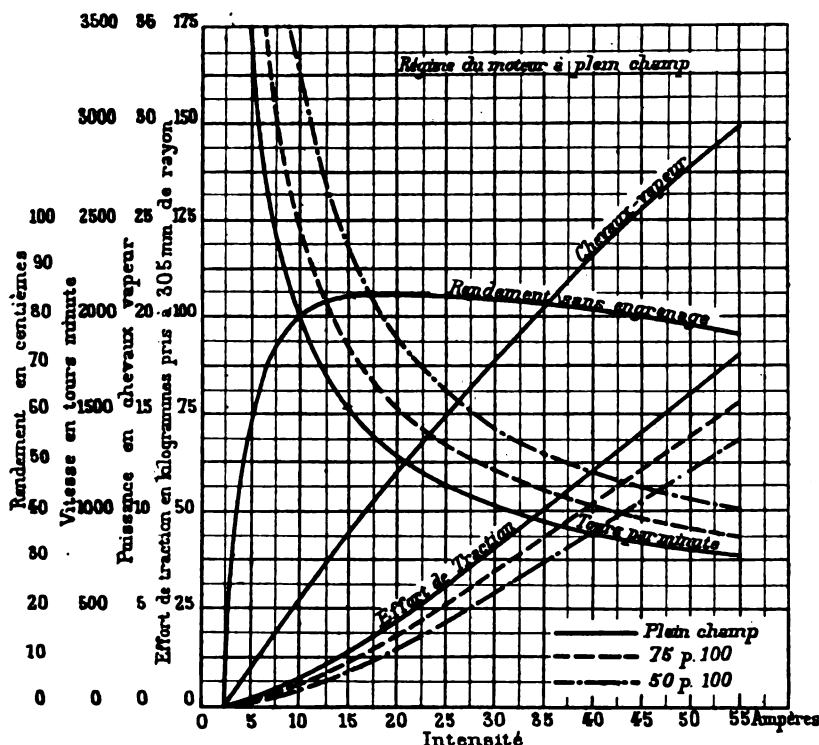


Fig. 4. — Caractéristique d'un des moteurs de 20 chevaux utilisé sur un châssis à deux moteurs.

dre qu'à la vitesse normale, ce qui représente une économie sensible de courant par rapport au châssis à simple moteur.

» Dans ces conditions, nous estimons que, malgré son prix d'achat plus élevé, le châssis à deux moteurs convient dans le cas de lignes à arrêts fréquents ou de lignes à profil accidenté.

MOTEURS ÉLECTRIQUES

» Les moteurs électriques de trolleybus sont analogues aux moteurs de traction employés dans les tramways électriques, mais le régime de vitesse est beaucoup plus élevé.

» Ces moteurs sont généralement à excitation série et souvent disposés pour réglage de vitesse par shuntage du champ allant jusqu'à 50 pour 100.

» Ils sont du type ventilé ou du type hermétique, et la plupart munis de paliers à roulements à billes.

» Leur puissance dépend du type de châssis et peut aller depuis

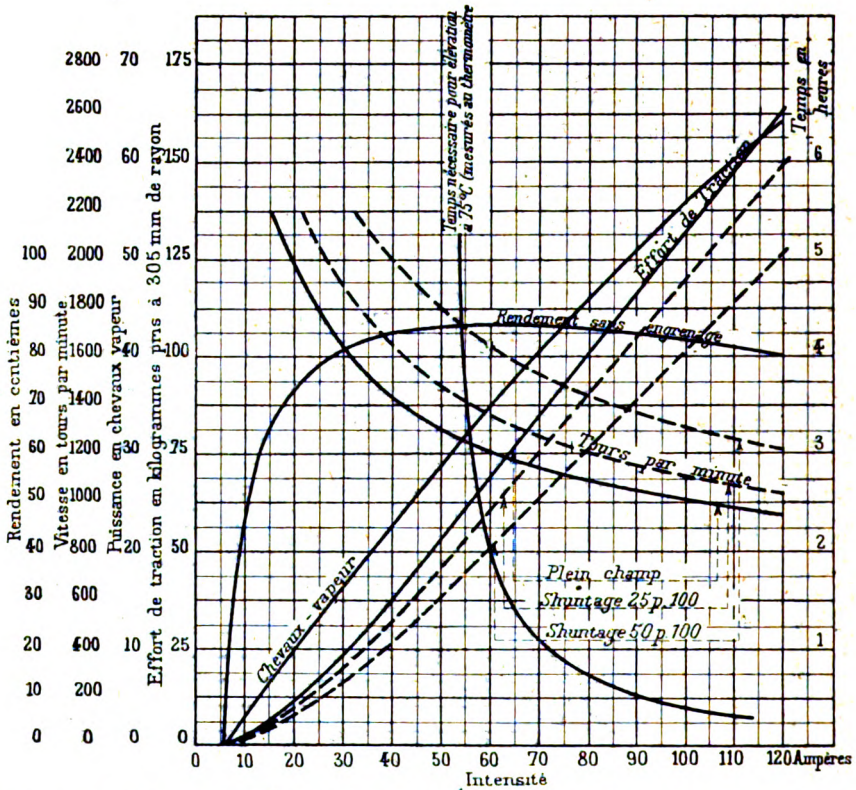


Fig. 5. — Caractéristique d'un des moteurs de 42 chevaux types D. K. pour châssis à un seul moteur.

15 jusqu'à 70 chevaux, suivant le nombre de moteurs et l'importance du véhicule.

» Pour un trolleybus normal de 35 places, pesant environ six tonnes, la puissance totale des moteurs est de l'ordre de 40 chevaux.

» Les figures 4 et 5 reproduisent les caractéristiques des moteurs de 20 chevaux pour châssis à deux moteurs et de 42 chevaux pour châssis à simple moteur, types D. K. des Constructions électriques de France.

» La figure 6 représente la photographie d'un de ces moteurs muni de son frein en bout d'arbre.

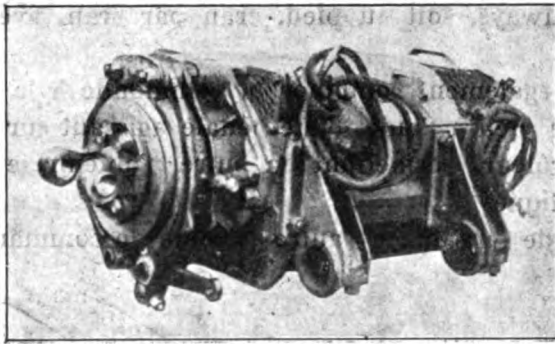


Fig. 6. — Moteur D. K-C. E. F.

CONTRÔLEURS

» Les contrôleurs de trolleybus sont également analogues aux contrôleurs des tramways électriques.

» Avec le châssis à double moteur, le contrôleur est disposé

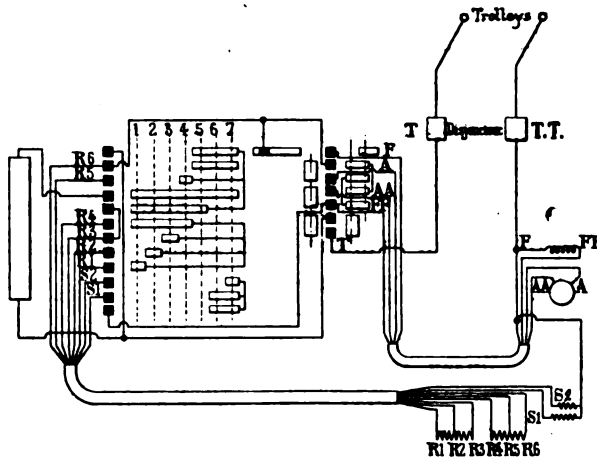


Fig. 7. — Diagramme des connexions pour trolleybus à deux moteurs.

pour démarrage rhéostatique, couplage série parallèle et réglage de la vitesse par shuntage du champ.

» La figure 7 reproduit le schéma des connexions d'un trolleybus à deux moteurs, système Railless, des Constructions

électriques de France, et la figure 8 le schéma des connexions d'un trolleybus à simple moteur.

» La commande du contrôleur est faite soit à la main, comme dans les tramways, soit au pied, cran par cran, avec rappel à zéro.

» On peut également combiner la commande à la main et la commande au pied à l'aide d'une pédale agissant sur le premier plot du contrôleur, permettant en outre d'obtenir le déclenchement automatique.

» Le choix de l'un ou de l'autre système de commande dépend

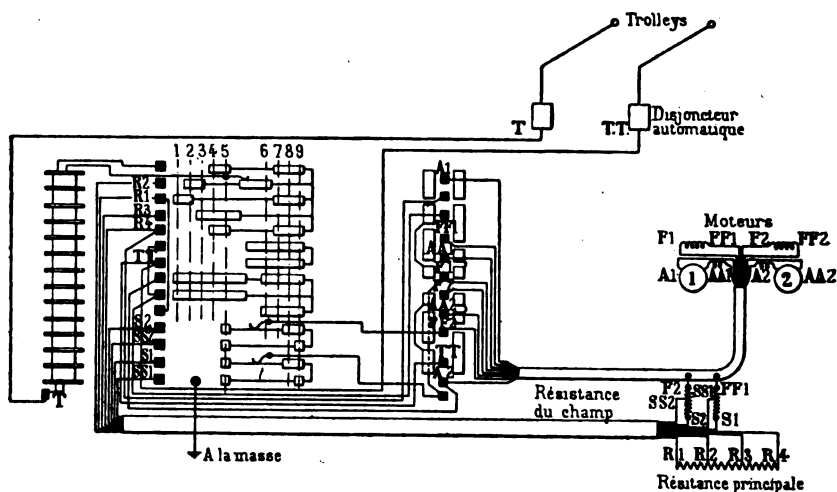


Fig. 8. — Diagramme des connexions pour trolleybus à simple moteur.

des conditions du service. En principe, la commande au pied s'applique pour la circulation urbaine et la commande à la main, aux véhicules devant circuler sur route.

PRISE DE COURANT AÉRIENNE

» Le dispositif de captation du courant de la ligne aérienne est un des organes les plus importants qui constitue la caractéristique principale des différents systèmes de trolleybus.

» Certains systèmes utilisent un chariot remorqué ou automoteur, le contact étant établi au-dessus de la ligne aérienne. D'autres systèmes prennent le contact par-dessous la ligne aérienne et sont caractérisés par l'emploi de perches à la façon ordinaire des tramways.

» Enfin, il existe également quelques systèmes à contact latéral et à contact mixte au-dessus et au-dessous de la ligne aérienne.

» Dans le système Lombard-Gerin, qui remonte à 1900, l'organe de prise de courant était constitué par un chariot automate équilibré par un contrepoids et relié à la voiture par un câble souple avec dévidoir automatique pour régler la tension du câble.

» Le moteur du chariot était un moteur synchrone alimenté par des courants triphasés provenant du moteur-série à courant continu actionnant le véhicule.

» Le poids excessif de ce chariot (environ 18 kg) et la complication du système l'ont fait abandonner.



Fig. 9. — Prise de courant Mercedes.

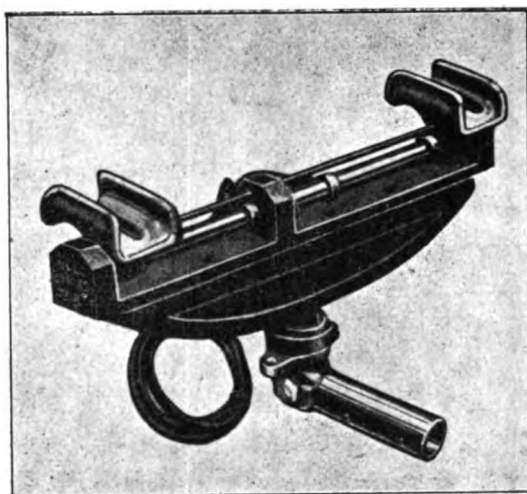


Fig. 10. — Prise de courant Brill.

» Dans le système Mercedes-Stoll, que représente la figure 9, le courant est capté par un chariot à 4 galets roulant sur les conducteurs, stabilisé par un contrepoids et traîné par un câble souple s'enroulant sur un dévidoir fixé à la voiture.

» A l'autre extrémité, le câble souple forme une boucle avant d'être relié au pendule du trolley.

» Par la combinaison d'une cordelette de chanvre venant s'enrouler dans un barillet à ressort logé dans le contrepoids, l'ensemble constitue un système amortisseur destiné à supprimer les

à-coups produits par les changements brusques de direction. Un jeu latéral de deux à trois centimètres est prévu dans les galets

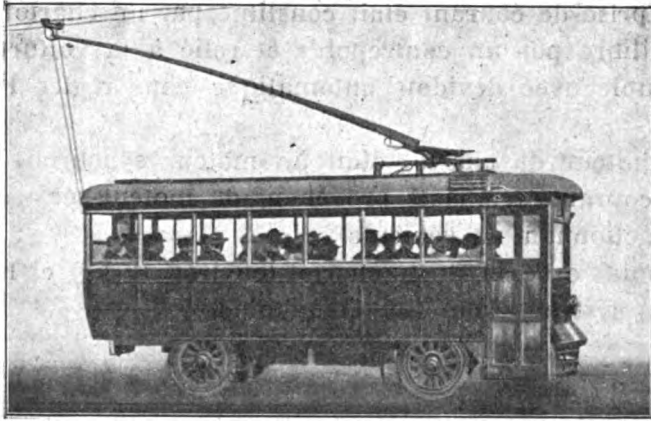


Fig. 11. — Trolleybus, système Brill.

de roulement du chariot pour lui permettre de s'inscrire aisément dans les courbes.

» La prise de courant Brill, que représente la figure 10, esst

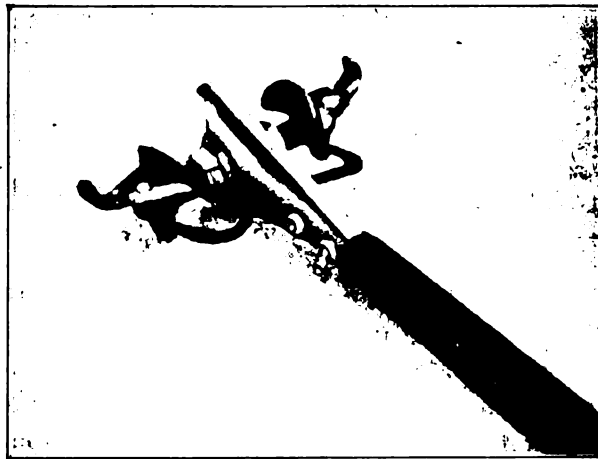


Fig. 12. — Prise de courant Schiemann.

du type à contact glissant. Les deux frotteurs sont agencés sur une tête isolante montée sur pivot et articulée à l'extrémité de la perche. La pression exercée sur le fil est de l'ordre de

16 kg:cm² ; le désaxement possible du véhicule est d'environ 4 mètres.

» La figure 11 représente un trolleybus système Brill.

» Dans le système Schiemann, appliqué à Mulhouse, et que représente la figure 12, l'organe de prise de courant est également un appareil glissant monté à l'extrémité d'une perche et attaquant le fil de contact par dessous. Le véhicule peut se déplacer de 3 mètres environ par rapport à la ligne aérienne.

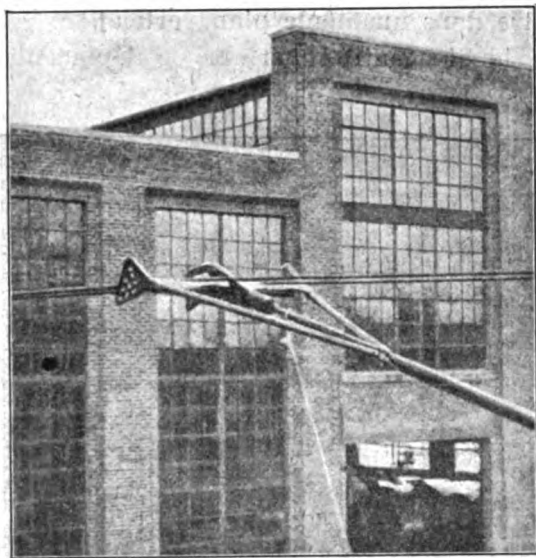


Fig. 13. — Prise de courant G. E.

» Dans un système américain analogue, que représente la figure 13, la prise de courant glissante, disposée à l'extrémité de la perche, est constituée par deux éléments d'archets isolés entre eux.

» La prise de courant Soleri, que représente la figure 14, est appliquée dans certaines exploitations italiennes, en particulier sur la ligne de Chiusa di Pesio. Elle comprend essentiellement un système de deux roulettes de trolley ordinaire accouplées sur une traverse en bois imprégné. Au milieu de cette traverse isolante, est fixée une pièce à rotule sphérique qui se trouve reliée à la perche du trolley par une sorte de col de cygne. La pression exercée sur le fil est de l'ordre de 18 kg:cm².

» Le système Cantono est également employé en Italie. Ainsi

que le représente la figure 15, l'organe de prise de courant est constitué par un chariot à quatre roulettes isolées deux à deux et se déplaçant à la partie inférieure de la ligne aérienne. L'ensemble du chariot est supporté par une pièce à rotule agencée à l'extrémité d'une perche analogue aux perches de tramways. La pression exercée par le chariot sur le fil est de l'ordre de 30 kg:cm².

» La figure 16 représente le système Kohler, qui est caractérisé par le fait que les deux fils de ligne se trouvent placés l'un au-dessus de l'autre dans un même plan vertical.

» Au-dessus du fil négatif supérieur, se déplacent deux petites

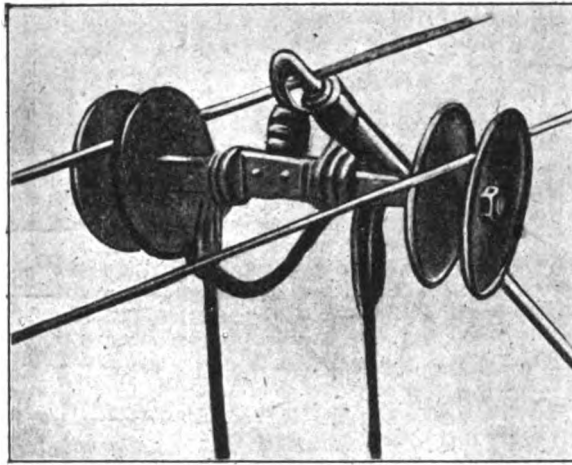


Fig. 14. — Prise de courant Soleri.

roulettes, tandis que deux frotteurs tirés par des ressorts viennent appuyer sous le fil positif inférieur. Comme dans le système Mercedes-Stoll, le câble souple est agencé en boucle élastique avant son attache au chariot, pour amortir les secousses de la marche. Ce système a l'inconvénient de compliquer l'établissement de la ligne aérienne de prise de courant.

» Le système de prise de courant Railless, imaginé par l'ingénieur Munro, est un des plus intéressants et des plus répandus en Angleterre. Il est constitué par deux perches parallèles avec tête à roulette venant s'articuler et pouvant pivoter sur une base commune spéciale.

—» Sur cette base est agencé un système de cames fixes et de galets mobiles, qui a pour but d'éliminer automatiquement l'ef-



Fig. 15. — Prise de courant
« Cantono ».

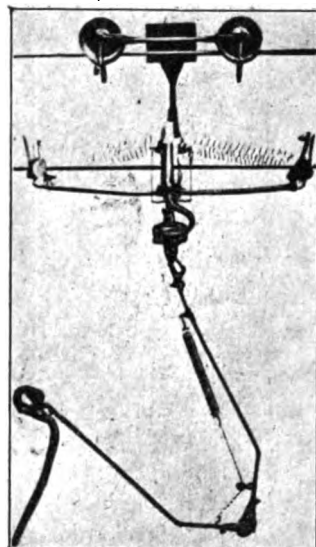


Fig. 16. — Prise de courant Kohler.

fort latéral du fil de trolley lorsque la base dévie de la position axiale, et cela afin d'éviter le déraillement de la roulette.

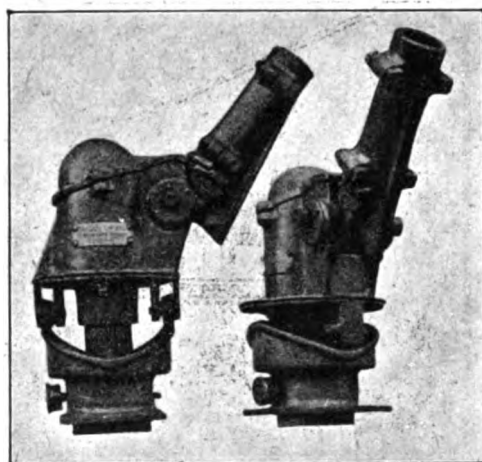


Fig. 17. — Détails de la base « Railless ».

» La figure 17 représente les détails de la base de trolley, système Railless, que l'on voit en coupe sur la figure 18, et la figure

19 l'ensemble de la base qui est prolongée par un tube, dans

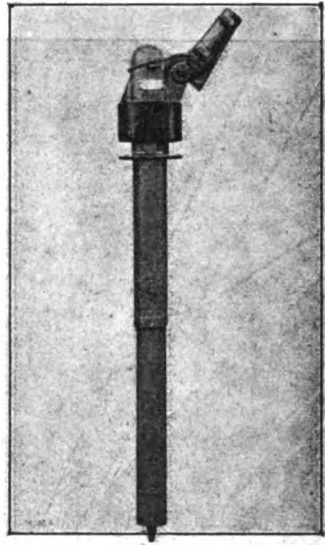
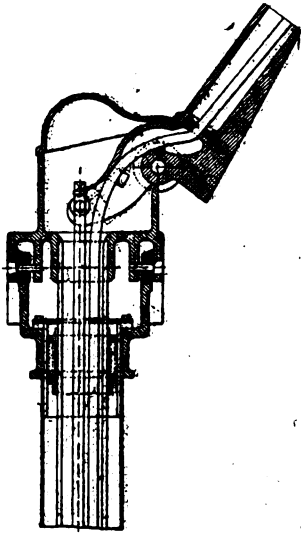


Fig. 18. — Coupe de la base.

Fig. 19. — Ensemble de la base Railless.

lequel se trouvent logés les ressorts d'appui des cames et les ressorts de tension de la perche.



Fig. 20. — Trolleybus, système Railless.

» Cette disposition a, en outre, l'avantage de reporter l'effort exercé par l'organe de prise de courant sur les montants de la

caisse ou sur le châssis, en vue de diminuer la fatigue de la toiture.

» Le système de prise de courant Railless permet au véhicule de se déplacer de 6 mètres à droite et à gauche de l'axe de la ligne de prise de courant.

» La figure 20 représente l'ensemble du trolleybus, système Railless, des Constructions électriques de France.

» M. Lorin a établi une étude documentaire et critique des différents systèmes de captation du courant dans un rapport présenté à la deuxième Assemblée générale technique de l'Union

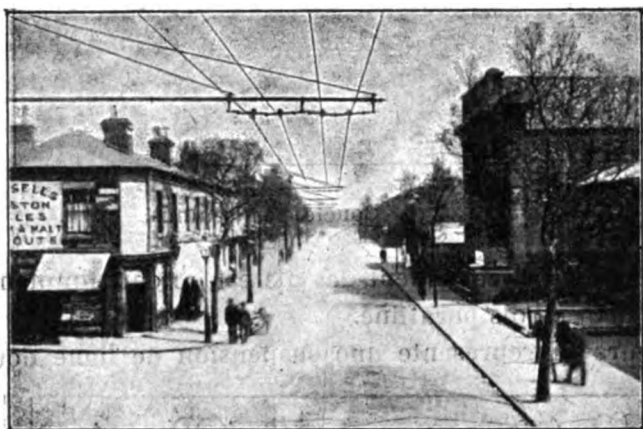


Fig. 21. — Ligne aérienne à Birmingham.

des Voies ferrées d'Intérêt local et des Transports publics automobiles de France, dans laquelle l'auteur conclut en faveur des systèmes de prise de courant du type à double perche, qui présentent de nombreux avantages au point de vue du fonctionnement et de la facilité d'équipement des lignes aériennes. C'est également la conclusion que nous avons tirée de notre étude comparative.

LIGNE AÉRIENNE

» L'équipement des lignes aériennes de trolleybus est analogue à l'équipement d'une ligne double de tramways, avec la seule différence que les fils de polarité différente sont isolés entre eux. L'écartement des fils, dans la plupart des systèmes, est de l'ordre de 350 mm.

» Les canalisations aériennes sont supportées, soit par des pylônes à consoles en bois ou en métal, soit par des transversaux. Il existe des systèmes de supports d'une seule pièce comportant tout le dispositif d'isolement nécessaire. Dans certaines instal-

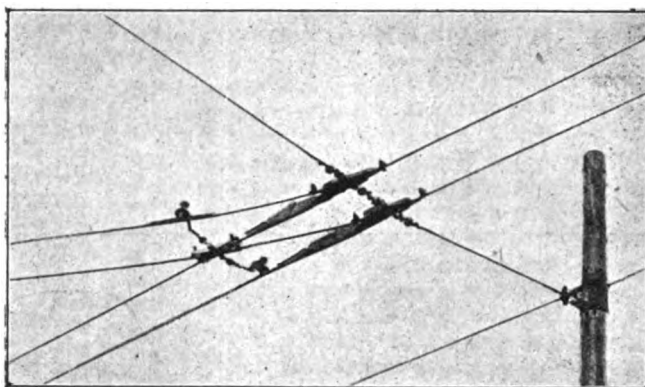


Fig. 22. — Boucle de terminus.

lations italiennes, l'écartement des fils est obtenu simplement par des morceaux de bois paraffiné.

» La figure 21 représente une suspension de ligne double sur

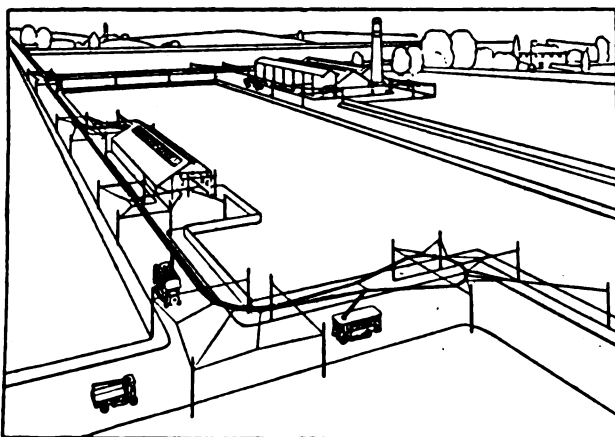


Fig. 23. — Schéma d'une ligne à double circulation avec boucle terminus, garage et usine génératrice.

consoles, à Birmingham, qui servait précédemment pour le service des tramways.

» La figure 22 représente l'amorce d'une console terminus, montrant les détails de l'isolement.

» La figure 23 correspond à une vue panoramique d'une installation de trolleybus, système Railless.

» La tension généralement adoptée dans les lignes aériennes de trolleybus est, comme pour les tramways, du courant continu à 550 volts.

» Les feeders d'alimentation relient la ligne aérienne à la sous-station ou à l'usine génératrice.

» Les dispositifs de sectionnement et de protection contre la foudre sont analogues à ceux usités dans les canalisations de lignes aériennes pour tramways. »

TROISIEME PARTIE

Applications de Trolleybus.

AMÉRIQUE.

» Les trolleybus ont fait récemment leur apparition en Amérique où, malgré le bas prix de l'essence, ils ont réussi à s'implanter.

» Des essais ont été effectués durant l'année dernière à Richmond, Norfolk, Philadelphie, Détroit, et deux lignes sont exploitées avec ce système dans la Cité de New-York, qui a en service 22 trolleybus, tous équipés par la General Electric Cy, avec châssis de la Trackless Transportation Corporation. Les sous-stations automatiques sont équipées par la Westinghouse Electric Cy.

» M. Simmon, de la Westinghouse Electric Cy, a publié une étude très documentée sur les trolleybus dans l'*Electric Railway Journal* du 10 septembre 1921.

» Dans cette étude, l'auteur conclut que l'autobus à trolley est de beaucoup le système le plus économique pour les voies peu fréquentées. Dans le cas d'un faible trafic, il est supérieur à la fois au tramway léger dit « safety-car » et à l'autobus à essence. Si le trafic est très intense, le « safety-car » reprend l'avantage sur l'autobus électrique, mais ce dernier reste toutefois, dans tous les cas, beaucoup plus économique que l'autobus à essence, à cause du prix du carburant et des frais élevés d'entretien du mécanisme.

» D'après M. Simmon, si le tramway électrique ne passe que toutes les 18 minutes, les autobus à trolley sont plus économiques ; si les départs sont espacés de plus de 40 minutes, les autobus à essence eux-mêmes reprennent l'avantage.

» M. Thirlwall, de la General Electric Cy, a publié dans la *General Electric Review* de décembre 1921, une étude sur les trolleybus également très nourrie de documents, et d'où il résulte qu'avec des « safety-car », l'exploitation est plus économique lorsque les départs sont espacés jusqu'à 6 minutes ; au delà de cette fréquence commencerait la zone d'utilisation économique des trolleybus. L'autobus à essence ne reprendrait l'avantage que pour les départs espacés de plus de 60 minutes.

» Le tableau suivant résume la documentation de M. Thirlwall et définit les dépenses totales d'exploitation exprimées en cents par voiture-mile, en fonction du nombre total annuel de voitures-miles, en ramenant l'étude comparative au même nombre de places :

TRAFFIC	Très léger	Léger	Moyen	Demi-lourd	Lourd	Très lourd
Car-mile	36 300	39 300	97 600	127 000	220 000	530 000
Intervalle moyen des départs	30 min	20 min	10 min	7 min 5 s	6 min 5 s	4 min 15 s
Tramways	56,8	45	36,7	36	31,6	28,2
Trolleybus	27	24,5	25,8	26,5	25,5	26,6
Autobus	30,9	30,8	32,8	34	33,1	34,2

» M. Thirlwall estime que les dépenses d'entretien d'un trolleybus sont environ le double de celles d'un tramway léger et environ la moitié de celles de l'autobus.

» Ces deux études publiées par des auteurs américains confirment les conclusions que nous avons déduites précédemment de notre étude économique comparative, en ce qui concerne les tramways et les trolleybus.

» Par contre, le champ d'utilisation des autobus est plus étendu en Amérique, ce qui est dû au bas prix d'achat du carburant dans ce pays essentiellement producteur de combustibles liquides.

» La Packard Motors Car Cy de Détroit a également construit, récemment, un trolleybus, en utilisant les pièces principales d'un châssis d'autobus à essence. Les moteurs électriques sont placés à l'avant du véhicule sous un capot à la place du moteur à explosion.

» Ces moteurs, du type « **safety-car** », ont chacun une puissance de 25 chevaux, et sont montés en tandem sur le même axe perpendiculairement aux essieux des roues motrices.

» Deux trolleybus sont prévus montés chacun sur une base différente. Le contrôleur est manœuvré au pied.

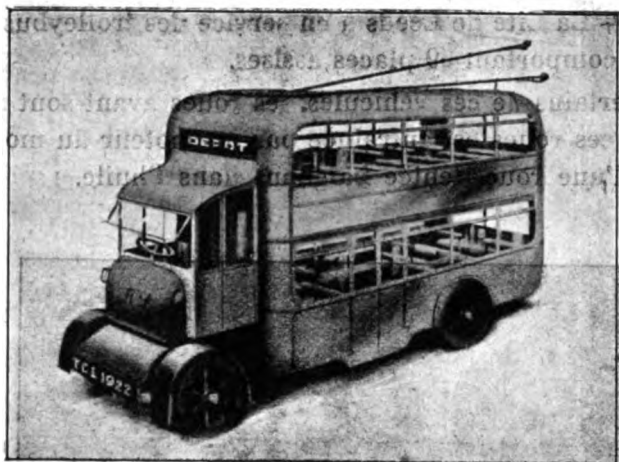


Fig. 24. — Trolleybus, système Saint-Louis Trachless Trollicar.

» Le poids du véhicule est de 55 tonnes environ et peut atteindre une vitesse maximum de 36 km/h.

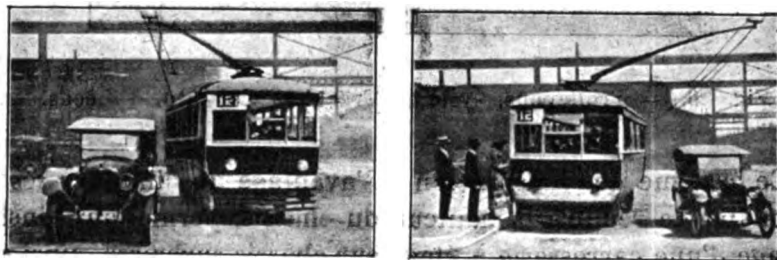


Fig. 25. — Trolleybus, système Brill, à gauche dépassant une voiture, à droite serrant le trottoir pour prendre des voyageurs.

» Un certain nombre d'autres maisons américaines se sont spécialisées dans la construction des trolleybus.

» La figure 24 représente un trolleybus de la Saint-Louis Trachless-Trollicar et la figure 25, un trolleybus de la Brill Cy. de Philadelphie.

ANGLETERRE.

» Il existe, en Angleterre, un grand nombre d'applications de trolleybus, généralement contrôlées par les municipalités. Nous citerons, en particulier, les villes de Leeds, Bradford, Birmingham, York, Tees-Side, Rotherham, Ramsbottom, etc...

» *Leeds*. — La Cité de Leeds a en service des trolleybus à impériale vitrée comportant 59 places assises.

» Dans certains de ces véhicules, les roues avant sont motrices, chacune de ces roues est entraînée par un moteur au moyen d'un pignon et d'une roue dentée baignant dans l'huile.

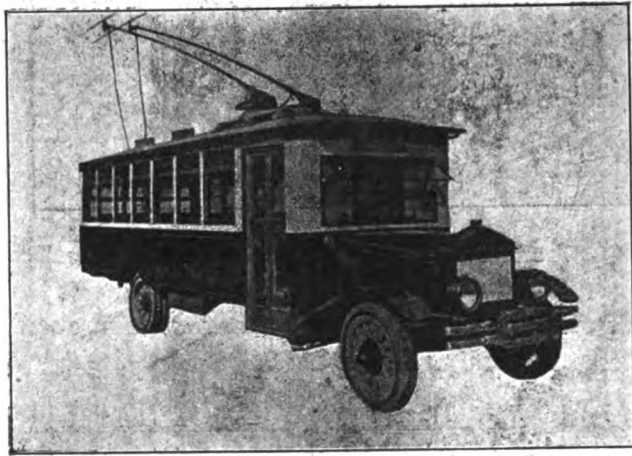


Fig. 26. — Trolleybus, système Trackless Car Ltd, à Leeds.

» Ce système de transmission a l'avantage de diminuer les vibrations et de réduire la hauteur du châssis, permettant ainsi le montage d'une carrosserie à étage sur châssis surbaissé, ainsi que le représente la figure 26.

» Par contre, la direction est plus difficile, surtout si un des moteurs vient à être mis hors circuit.

» Comme particularité intéressante, ces trolleybus peuvent circuler aussi bien sur les voies de tramways que sur les routes. Dans le premier cas, l'un des trolleys reste baissé et la prise de courant à la terre s'effectue au moyen d'un patin en fer à adhérence magnétique glissant dans les rainures des rails.

» *Bradford*. — Il existe en service, à Bradford, 19 trolleybus, dont un certain nombre à impériale vitrée.

» Les premiers essais remontent à 1911. Les châssis sont du type à simple moteur et du type à double moteur.

» Trois lignes sont actuellement exploitées et trois autres lignes sont en projet.

» Le plan que nous reproduisons à la figure 27 représente l'en-

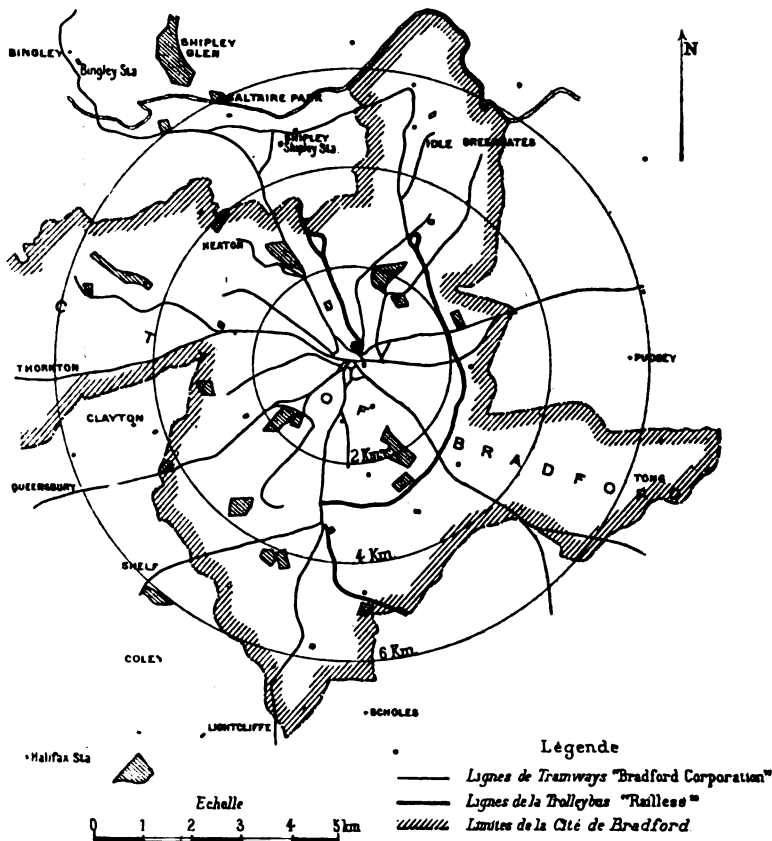


Fig. 27. — Plan des tramways de la Cité de Bradford.

semble du réseau de la Cité de Bradford comme tramways et trolleybus.

» La Corporation des Tramways de Bradford vient également de mettre en service, à titre d'essai, un trolleybus à 6 roues du type à impériale, pouvant contenir de 59 à 65 voyageurs et actionné par un seul moteur de 70 chevaux attaquant l'essieu par chaîne.

» La voiture comporte deux freins mécaniques, dont l'un est commandé par un volant placé immédiatement en dessous du volant de direction, et l'autre par une pédale combinée avec un levier à main. Cette voiture comporte également un freinage électrique.

» Une disposition de double suspension par ressorts à lames et à boudins permet d'obtenir une suspension excellente, même sur mauvaise route.

» Cette voiture peut atteindre 18 km:h, et peut circuler sur des pentes de 8 pour 100.



Fig. 28. — Trolleybus, système Railless, de la ville d'York.

» Le poids total de la voiture en ordre de marche est d'environ 7 500 tonnes ; les quatre roues avant sont directrices et les deux roues arrière motrices.

» La prise de courant comporte 2 perches parallèles avec base à ressorts extérieurs et tête à frotteurs.

» Comme à Leeds, les trolleybus de Bradford peuvent circuler sur les voies de tramways, à l'aide d'un sabot traîné dans l'ornière du rail, mais cette disposition n'est utilisée pratiquement que pour l'entrée au dépôt qui est commun aux trolleybus et aux tramways.

» A titre indicatif, nous donnons ci-après le détail des dépenses d'entretien du matériel exprimé en pence par voiture-mile:

Réparations des voitures.

Armature	0,472
Inducteurs	0,017
Résistances	0,007
Trolley	0,173
Contrôleur	0,173
Roues seules	0,096
Pneumatiques neufs	0,750
Réparation bandages	0,005
Axes droits	0,069
Roulement à billes	0,156
Freins	0,425
Gardes fous	0,033
Caisse	0,770
Moteurs divers	0,019
Balais	0,095
Câbles	0,067
Huiles	0,178
Transmission chaîne	0,653
Divers	0,007
Châssis	0,760
Direction	0,065

» M. Wilkinson, Directeur général de la Corporation des Tramways de Bradford, estime que les trolleybus sont plus économiques que les tramways lorsque les départs sont espacés de plus de 3 minutes pour les lignes à voie simple et de plus de 2 minutes pour les lignes à voie double.

» Le tableau ci-après résume les dépenses d'exploitation afférentes aux trolleybus pour l'exercice 1920-1921, en pence, par voiture-mile :

Dépenses de trafic	9.618
Dépenses générales d'administration	1,345
Dépenses générales d'entretien (routes, ligne, bâtiments, usine, voiture)	7,787
Dépenses de courant à 1,5 pence par kw-h	1,821

» Les recettes ressortent à 20,576 pence par voiture-mile.

» *Birmingham*. — Des trolleybus à impériale de 59 places équipés avec châssis Railless à deux moteurs de chacun 42 chevaux sont en service.

» Les résultats d'exploitation ont été si concluants que la municipalité vient de décider de remplacer une ligne de tramways existante, dont la voie avait besoin d'être renouvelée, par un service de trolleybus, qui comprendra 12 voitures à impériale.

» Cette décision a permis d'éviter ainsi une dépense d'immobilisation de rails de 50 000 livres. De plus, la municipalité espère convertir en bénéfice le déficit de cette ligne de tramways qui était annuellement d'environ 3 000 livres.

» *York.* — La municipalité exploite, depuis deux ans, une ligne de trolleybus comportant 4 voitures de 25 places assises, avec châssis Railless, type à 2 moteurs de 20 chevaux, et commande de l'essieu arrière par vis sans fin.

» Le contrôleur, commandé à la main, est du type rhéostatique série parallèle, avec shuntage des inducteurs à 50 pour 100.

» Les perches de trolley, du système Railless, permettent un déplacement du véhicule de 6,50 m ; elles peuvent s'inscrire dans des courbes de 5 m de rayon aux boucles des terminus.

» Ces voitures comportent un frein mécanique à pédale agissant sur les roues motrices et un frein mécanique à pédale et à levier agissant sur l'arbre des moteurs.

» Les départs ont lieu à intervalle d'un quart d'heure l'après-midi et d'une demi-heure le matin ; la longueur totale du parcours est d'environ 2 kilomètres et comporte sept stationnements.

» La figure 28 représente la photographie d'un de ces véhicules avec porte à l'avant, afin de permettre au conducteur de percevoir lui-même le prix des places à l'aide d'un appareil à tronc.

» La Cité de York exploite également dans son réseau des tramways, des autobus et des électrobus à accumulateurs alcalins.

» Les dépenses d'exploitation ressortent, en pence par voiture-mile, pour l'exercice 1920-1921, à :

Tramways	17,35
Trolleybus	11,53
Autobus	16,25

» Le bilan 1922 fait ressortir les trolleybus à 11,60 pence par voiture-mile. Les dépenses d'exploitation se décomposent :

Salaire des conducteurs	3,98
Entretien de la ligne et des voitures..	3,93
Assurance et contributions	1,55
Dépense d'énergie	1,72
Entretien des bâtiments	0,41

» La consommation d'énergie ressort à 0,915 kw-h par voiture-kilomètre sur route en bon état, rampe maximum de 3 pour 100.

» Pour rentrer au dépôt, les trolleybus empruntent la voie du tramway. A cet effet, sur ce tronçon commun, la ligne aérienne du tramway comporte un fil négatif supplémentaire.

» *Tees-Side.* — Un réseau de trolleybus dessert les deux localités de Middlesborough et Easton.

» 28 voitures sans impériale sont en service depuis trois ans et

desservent des itinéraires d'une longueur totale d'environ 8 kilomètres.

» Les départs sont espacés d'environ 10 minutes.

» Ces trolleybus sont du système Railless, 26 places, avec châssis à double moteur de 20 chevaux, et les autres à simple moteur de 35 chevaux.

» La commande de l'essieu arrière est faite par l'intermédiaire d'une vis sans fin.

» Six nouvelles voitures ont été mises en service en 1920.

» Dans la première série des voitures, le contrôleur est commandé à la main, et dans la deuxième série la commande du contrôleur est faite au pied.

» Les dépenses d'exploitation ressortent à 2,20 francs par voiture-kilomètre.

» *Ramsbotom.* — A Ramsbotom, il y a en service 6 trolleybus, du type Railless, à double moteur, et d'une capacité de 26 places assises.

» Le bilan pour l'exercice 1921, en pence par voiture-mile, ressort à :

Dépenses de trafic	8.20
Dépenses générales d'administration	0.92
Dépenses générales d'entretien (route, ligne, bâtiments, usines, voitures)	9.52
Dépenses de courant	1.83
TOTAL.....	20.47

ITALIE.

» Le système de traction par trolleybus, dit « Filovia », a été également très développé dans ce pays.

» Dans une exploitation de l'Italie centrale, qui remonte à 1907, les dépenses par voiture-kilomètre, en 1919, ressortent à 1,90 lire, se décomposant en :

Salaire	1,32
Energie électrique	0,06
Entretien de la ligne de contact.....	0,04
Entretien du matériel roulant	0,31
Entretien de l'usine	0,02
Frais généraux	0,15

» Le nombre de voitures-kilomètre annuel est d'environ 60 000;

la longueur du parcours, de 3,500 km ; la rampe normale, 4 pour 100 et la rampe maximum, 8 pour 100.

» Pendant le cours de la dernière grande guerre, de nombreuses applications de la traction électrique sur route furent réalisées par le Génie militaire italien, pour desservir certaines parties très accidentées du front.

» La ligne de Primolano-Enego, d'une longueur de 12 km, avec une pente moyenne de 6 pour 100, et une pente maximum de 11 pour 100, était desservie par 10 trolleybus.

» La partie mécanique du châssis était analogue au type Fiat; les moteurs électriques de 12 à 15 chevaux attaquaient les roues, au début, par chaîne, et ensuite la transmission fut réalisée par vis sans fin. Le trolley de prise de courant comportait un chariot à quatre roues isolées deux à deux, à l'aide de traverses en bois bouilli et paraffiné.

» Une extension future de cette ligne avait été envisagée à l'époque pour relier, après la guerre, la vallée de la Brenta au plateau des Sept-Communes.

» A la suite des résultats obtenus par la « Filovia » de Primolano-Enego, les services compétents de l'armée italienne furent amenés à envisager l'extension de ce genre de locomotion qui s'imposait dans ces régions, par suite du déficit de charbon et de carburant et des disponibilités d'énergie hydroélectrique.

» Près de 300 kilomètres de lignes étaient en service ou en construction sur le front italien au moment de l'armistice.

» En dehors de ces lignes provisoires, il existe en Italie d'autres lignes permanentes, parmi lesquelles nous citerons :

» La ligne de Coni à Chiusa di Pesio, d'une longueur totale de 15 km, et qui comprend 9 voitures de 24 places assises, équipées avec deux moteurs de 12 chevaux et pouvant atteindre 25 km:h en palier. Le nombre de voyages est de 4 à 6 par jour.

» La prise de courant est du type Solari à deux roulettes, montées à l'extrémité d'une perche. A signaler une particularité intéressante de la base du trolley. Grâce à un montage sur billes et à des frotteurs de prise de courant, la voiture peut tourner complètement sur place, ce qui évite les boucles aux terminus.

» La ligne de Cuorguè-Ivrea, d'une longueur de 25 km, comporte des voitures de 27 places assises, équipées avec deux moteurs de 12 chevaux, attaquant les roues par chaînes.

» Le nombre de voyages par jour est de cinq dans chaque sens.

» Le tableau ci-dessous résume les dépenses d'exploitation par voiture-kilomètre, pour l'exercice 1919 :

Personnel	0,50
Courant	0,07
Bandages	0,08
Entretien des voitures	0,15
Administration, divers	0,10

AUTRICHE.

» La traction électrique par trolleybus était déjà très développée avant-guerre, dans ces régions. La plupart des lignes étaient exploitées avec des châssis du type Mercedes-Stoll, dont la particularité est de comporter les moteurs électriques dans les roues.

» Parmi les lignes en service, on peut citer celles de Gmünd, Karsleburg, Potzleinsdorf, Vienne, etc...

SUISSE.

» Il existe également en Suisse des exploitations de trolleybus, qui utilisent la prise de courant Mercedes-Stoll, en particulier sur les lignes de Fribourg-Farvagny.

» Les châssis sont équipés avec deux moteurs Tribelhorn de 15 chevaux, attaquant les roues par chaînes à rouleaux.

ALLEMAGNE.

» Récemment, à Hambourg, une ligne de trolleybus vient d'être mise en service sur une longueur de 2,500 km. Chaque véhicule est équipé avec un moteur de 15 chevaux, dont le mouvement est transmis à l'essieu moteur par une vis sans fin.

» Les voitures pèsent 3 150 kg et peuvent contenir 22 personnes, dont 12 assises et 10 debout.

FRANCE.

» Les premières applications de trolleybus, en France, furent faites, il y a quelque vingt ans, en utilisant le système Lombard-Gerin, qui avait, comme particularité, d'utiliser un trolley automoteur.

» La construction du châssis, de l'équipement électrique et des trolleys, à cette époque, n'était pas au point comme à l'heure actuelle, et les exploitations de ce système qui furent réalisées, en particulier à Montauban et dans la forêt de Fontainebleau, furent remplacées par d'autres systèmes de traction, d'autant qu'à l'épo-

que la différence de prix d'énergie, essence et électricité, était moins avantageuse qu'à l'heure actuelle.

» Il existe à Mulhouse une exploitation de trolleybus avec prise de courant Schieman.

» A Constantine se trouve également un réseau de trolleybus avec prise de courant Mercédès-Stoll.

» Tout récemment, le département de la Savoie vient de décider la construction de deux lignes de trolleybus : l'une entre Modane et Lanslebourg, l'autre entre Saint-Pierre-d'Albigny et Aix-les-Bains, soit un réseau d'environ 75 km.

» M. Lévêque, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, et M. l'ingénieur Gex, ont fait une étude comparative excessivement intéressante, entre les trolleybus et les autobus, qui leur a permis de fixer en toute connaissance de cause leur choix en faveur du trolleybus.

CONCLUSIONS

» Nous résumons ci-dessous l'étude comparative des prix de revient qui ressortent, par voiture-kilomètre, à :

Prix de revient du kilomètre-voiture autobus.

Essence, 50 litres aux 100 kilomètres, à 2,50 fr	1,25
Bandages, 3 000 fr sur 10 000 kilomètres	0,30
Huile, 6 litres aux 100 kilomètres, à 4 francs	0,24
Graisse, 1 kg aux 100 kilomètres, à 4 francs	0,04
Réparations	0,30
Personnel de conduite (assurances comprises)	0,30
Personnel de l'atelier de réparations	0,10
Amortissement des voitures de 60 000 fr sur 150 000 kilomètres	0,40
Total: prix de revient partiel	2,93 fr
Frais généraux, amortissement, fonds de roulement ou péage	0,80
Prix de revient total	3,73 fr

Prix de revient du kilomètre-voiture trolleybus.

Courant, à 1,10 fr le kilowatt-heure	0,07
Bandages	0,20
Lubrifiants	0,04
Réparations	0,10
Personnel de conduite de l'usine et de l'atelier	0,21
Personnel de conduite des voitures (assurances comprises)	0,22
Amortissement des voitures et des installations 120 000	0,73
164 250	1,57 fr
Total : prix de revient partiel	1,57 fr
Amortissement, faux frais, etc., ou péage	0,98
Prix de revient total	2,55

» Ces résultats confirment ceux que nous avons pu recueillir nous-mêmes en Angleterre, où le prix de revient par voiture-mile autobus est de 21,6 pence, et pour le trolleybus 15 pence, soit une économie de 30 pour 100 en faveur des trolleybus dans les deux cas.

» Le département du Gard vient, également, récemment, de décider la construction d'une ligne de trolleybus d'environ 60 km. qui reliera Nîmes à Remoulins, le Pont du Gard, et qui comprendra 10 voitures à voyageurs de 35 places et 15 camions à marchandises.

» La conclusion de l'étude approfondie qui a été faite par M. Rogie, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, et M. Bonnet, directeur des Tramways de Nîmes, était la suivante :

» Pour assurer le trafic prévu avec des autobus à essence, la dépense d'énergie, au cours actuel, atteignait environ 960 000 fr par an, tandis qu'avec des trolleybus la dépense annuelle d'énergie était ramenée à 240 000 fr, ce qui représente une économie annuelle de 720 000 fr, susceptible d'assurer un amortissement rapide des dépenses totales de premier établissement évaluées à 3 500 000 fr.

» En dehors de ces deux réseaux en voie de construction, d'autres projets sont à l'étude, en particulier dans la région parisienne, et il est à souhaiter que ce système de traction atteigne dans notre pays le plein développement qui lui est assuré par ses qualités et ses avantages.

» Le trolleybus, en fait, n'exige que des dépenses de premier établissement excessivement réduites (60 à 80 pour 100 plus faibles que pour le tramway).

» Au point de vue confort, le trolleybus est nettement supérieur à l'autobus à essence, car il est très silencieux et supprime les trépidations du moteur à explosion et les à-coups du changement de vitesse. En outre, comme l'autobus à essence, il peut gravir sans difficulté des rampes très fortes, et venir se ranger le long des trottoirs, ce qui l'avantage dans les pays accidentés et dans les villes, par rapport au tramway.

« Au point de vue dépenses d'exploitation, il économise environ 30 pour 100 par rapport à l'autobus à essence, ce qui représente, pour une entreprise de transports en commun de moyenne importance, plus de 30 000 fr par voiture et par an.

» L'expérience récente a prouvé que l'augmentation progressive

des tarifs de transports n'a pas réussi à protéger du déficit les grandes entreprises et à sauver de la ruine les petites.

» Ce n'est uniquement que par la réduction des dépenses d'exploitation que les budgets pourront être équilibrés.

» L'emploi du trolleybus permettra, dans beaucoup de cas, de transformer un déficit en bénéfice.

» En dehors de ces considérations, même à dépenses égales, il est de l'intérêt national et de notre devoir d'électriciens de préférer le trolleybus à l'autobus, car le premier utilise nos disponibilités d'énergie électrique, alors que le second nécessite l'achat, à l'étranger, d'un produit relativement coûteux, dont l'importation grève lourdement notre balance commerciale. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Iglésis. Il donne la parole à M. Périquier pour présenter quelques remarques sur la communication de M. Iglésis.

Erratum. — Page 355, le cliché de la figure 7 correspond à la légende de la figure 8, page 356, et inversement.

L'OMNIBUS A DOUBLE TROLLEY

étudié par la Société des Transports en Commun de la Région Parisienne

M. PÉRIDIER. — « Vous m'excuserez de prendre la parole après la communication si intéressante que vient de nous faire notre collègue, M. Iglésis, sur les omnibus à trolley et sur l'intérêt qu'ils peuvent présenter au point de vue économique pour les exploitations de tramways électriques ou de voies ferrées d'intérêt local, après la crise résultant de la guerre ; mais j'ai pensé qu'il convenait de faire passer devant vos yeux quelques clichés qui montrent que la France, où ce système de traction a vu le jour il y a déjà pas mal d'années, du temps où Lombard-Gérin a fait ses essais avec le trolley automoteur, poursuit encore activement l'étude de la question et que les premiers essais de réalisation ont déjà recueilli le plus complet succès.

» La Société des Transports en Commun de la Région parisienne, à peine constituée, s'est empressée de reprendre les études qui avaient été déjà amorcées par la Compagnie générale des Omnibus de Paris, sous la direction de M. Bacqueyrisse, son Ingénieur en Chef et, après une série d'enquêtes poursuivies avec la plus grande attention à l'étranger, notamment en Italie et en Suisse, a entrepris la réalisation d'un châssis d'étude en vue de se rendre compte de ce que l'on peut attendre, dans les circonstances actuelles, dans la région parisienne, d'un semblable système de traction.

» Un examen rapide du réseau exploité par la Société des Transports en Commun de la Région parisienne démontre qu'indépendamment de toute question économique, l'emploi des omnibus à trolley ne pourra jamais présenter qu'une importance relativement peu considérable ; sauf exceptions particulières, il est à peu près impossible, en effet, d'envisager l'installation d'un semblable système de traction dans l'intérieur de la capitale, en raison des difficultés que présenteraient les croisements de la ligne aérienne de l'omnibus à trolley avec celle utilisée par les tramways électriques. Il ressort que les omnibus à trolley ne pourront vraisemblablement être employés qu'en banlieue, afin de rabattre les voyageurs sur les lignes de tramways existantes, en attendant la création d'un trafic suffisamment important pour justifier l'installation de voies. On arrive ainsi à la conception suivante : reconnaissance des futures lignes à desservir au moyen

d'omnibus thermiques ; si les résultats sont satisfaisants, premier stade d'exploitation avec omnibus à trolley nécessitant des frais d'installation relativement peu importants et, le jour où le trafic a pris un développement suffisant, installation de voies de tramways et raccordement au réseau existant.

» Il en résulte que les omnibus à trolley doivent essentiellement, aux environs des grandes villes, servir à prolonger les voies de tramways existantes ou à constituer l'amorce de lignes rabatteuses aboutissant aux voies ferrées déjà en service.

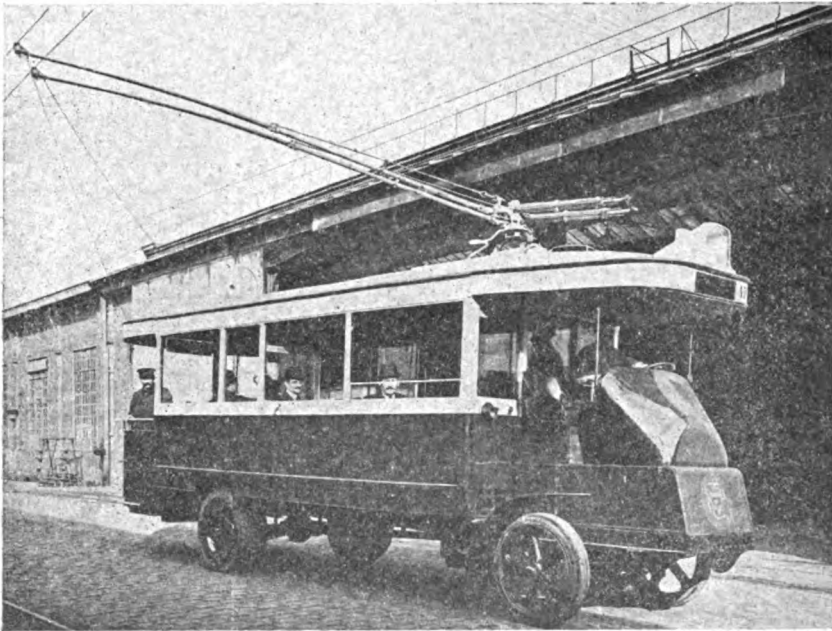


Fig. 1. — Autobus à trolley de la Société des Transports en Commun de la Région Parisienne.

» Les principaux caractères de ce système de traction ainsi compris peuvent se résumer comme suit :

» Installation essentiellement temporaire et pouvant être réalisée dans les conditions économiques les plus avantageuses et, point très important pour un réseau déjà constitué, création d'un matériel permettant l'utilisation aussi grande que possible des pièces de rechange existantes. Ce sont ces divers principes qui ont servi de guide à la Société des Transports en Commun de la Région parisienne dans l'étude de son omnibus à trolley.

» Le châssis qu'elle a établi n'est, en effet, que la reproduction

dans ses grandes lignes du châssis d'omnibus déjà bien connu des Parisiens (fig. 1 et 2).

» Ce châssis comporte 38 places et pèse, en charge, un poids de 8 200 kg. Le moteur à explosion ainsi que la boîte de vitesses ont été supprimés, mais tout le reste de la transmission : arbre à cardans, pont arrière, démultiplication dans les roues, a été main-

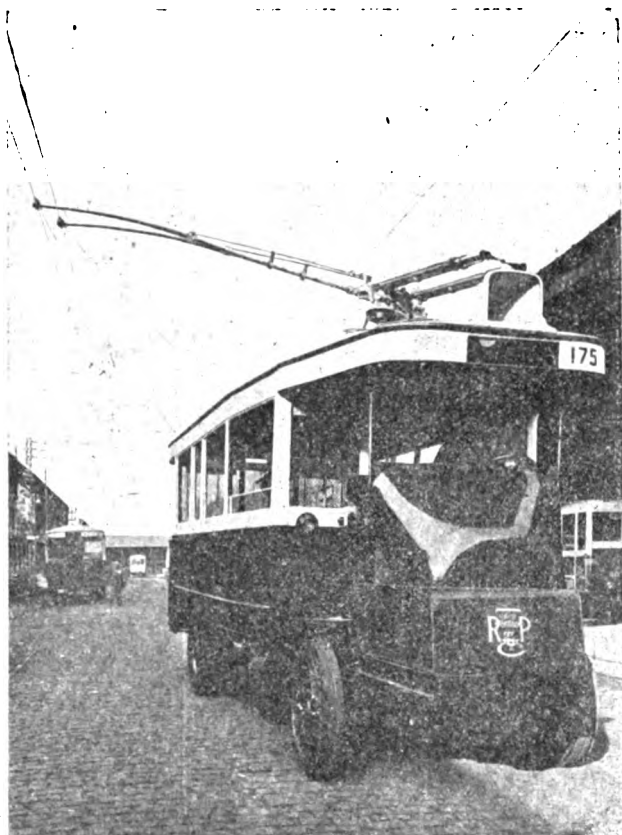


Fig. 2. — Autobus à trolley.

tenu. Dans ces conditions, je me limiterai à ne donner quelques renseignements que sur l'équipement électrique lui-même.

» Le courant est amené et distribué au moyen de deux lignes bipolaires équipées dans les mêmes conditions que les lignes aériennes ordinaires : un fil positif et un fil négatif. Après étude, la Société des Transports en Commun de la Région parisienne a estimé que la meilleure prise de courant serait une prise bipo-

laire (fig. 3) constituée par deux perches à déclenchement, du modèle ordinaire adopté sur les tramways ; ces deux perches sont montées sur une base à pivot unique ; chacune d'elles peut pivoter légèrement sur sa base afin d'accroître sa souplesse et d'épouser parfaitement les irrégularités de la double ligne aérienne. Les deux perches sont isolées l'une par rapport à l'autre. Je me permets de signaler à ce sujet que la pratique anglaise, que nous a rappelée tout à l'heure M. Iglésis, concorde avec les essais que nous avons effectués, et il semble que la perche double est beaucoup plus avantageuse que la perche simple. Les Américains, après avoir adopté sur leurs premiers omnibus à trolley la prise

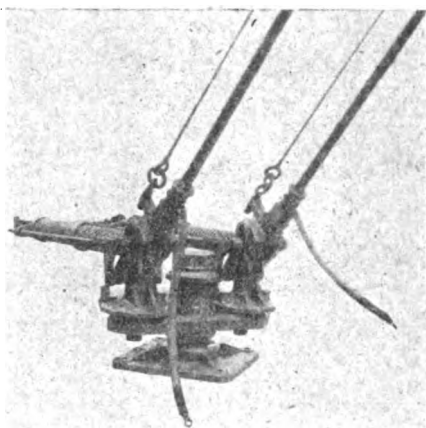


Fig. 3. — Embase du trolley double.

de courant à une seule perche, reviennent actuellement, après quelques essais infructueux, à la perche double.

» Les Italiens seuls semblent continuer à utiliser la prise de courant à une seule perche, mais elle comporte un chariot à quatre roulettes qui différencie complètement ce système de prise de courant de celles en usage jusqu'à ce jour pour les tramways. Comme les Anglais, nous estimons que, pour les installations qui doivent fonctionner aux environs des grandes villes possédant un réseau de tramways, il convient d'utiliser, ainsi que je l'ai dit plus haut, autant que possible le matériel existant.

» Avant de construire sa prise de courant, la Société des Transports en Commun de la Région parisienne a fait procéder à une série d'essais au moyen d'une perche montée sur un châssis d'om-

nibus thermique. Les essais ont été faits à des vitesses comprises entre 15 et 30 kilomètres à l'heure, avec des désaxements de 2 m environ ; aucun dérapage n'a été constaté.

» L'omnibus est équipé avec un seul moteur. Ce moteur, ventilé du type TH.553, a une puissance de 47 chevaux au régime uni-horaire de 550 volts et une vitesse à plein champ de 550 tours par minute. Son poids est de 800 kg environ. Une carcasce spéciale a été étudiée pour permettre sa fixation sur le châssis d'omnibus ; l'axe du moteur est parallèle à l'axe du véhicule. La poulie de frein sur

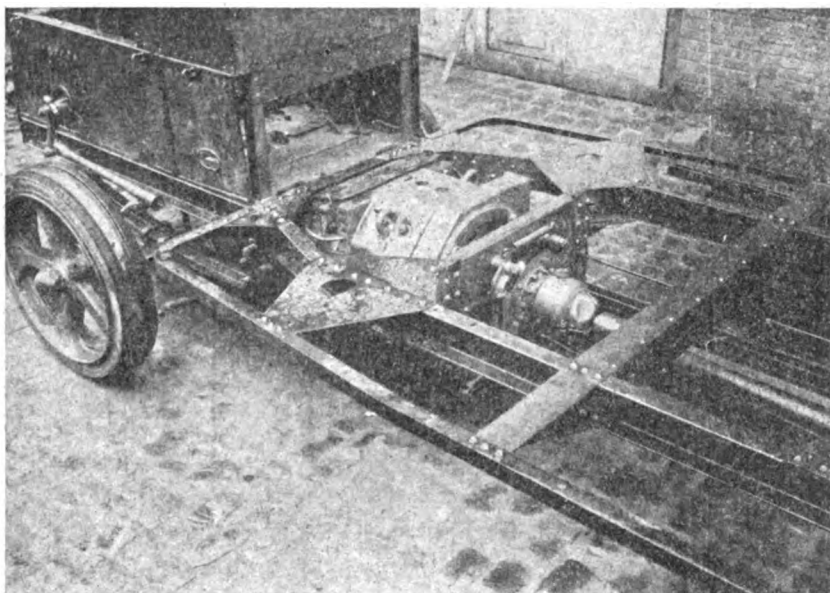


Fig. 4. — Disposition du moteur électrique sur le châssis.

mécanisme a été calée directement sur la partie conique de l'arbre du moteur et l'arbre à cardan installé à la suite transmet le mouvement au pont arrière du véhicule. L'emplacement du moteur a été déterminé tant par des commodités d'adaptation du châssis que par la nécessité d'assurer une bonne répartition des charges en vue d'éviter des surcharges aux fusées (fig. 4).

» Le moteur est prévu pour une marche en shuntage.

» L'emploi d'un seul moteur empêche de recourir à la régulation série-parallèle et on pourrait craindre, de ce fait, une augmentation de la consommation en énergie du véhicule. Il ressort d'études faites en collaboration avec la Compagnie française

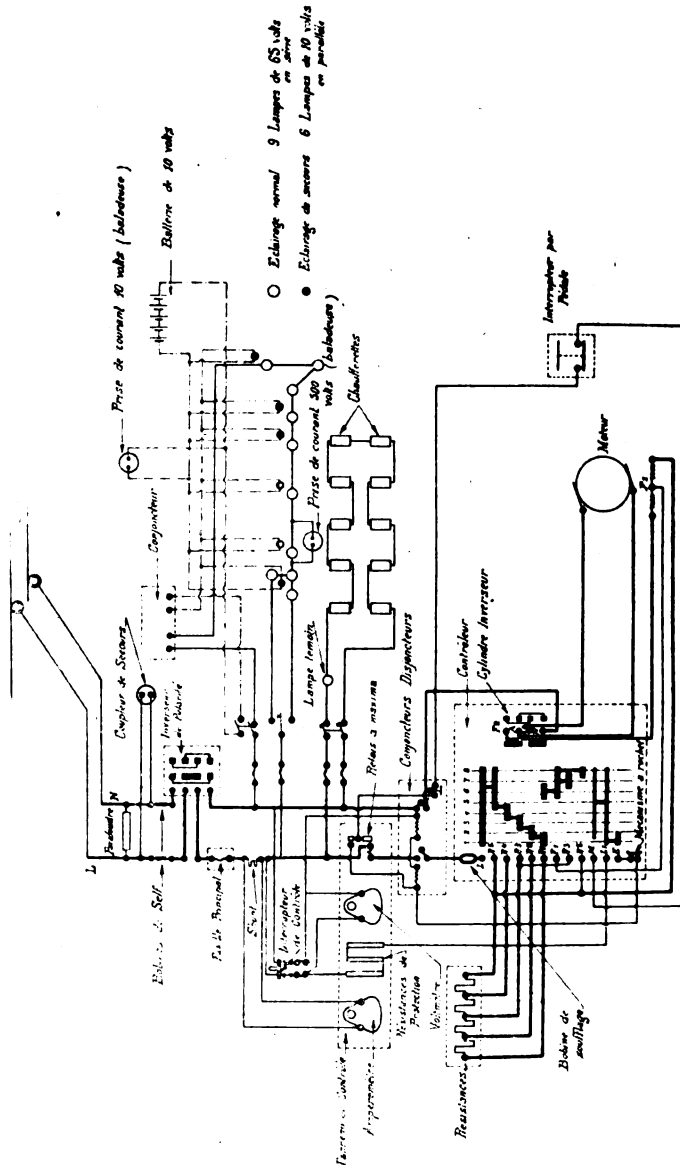


Fig. 5. — Schéma des connexions.

nie dûe au shuntage, ne serait pas supérieure à 3 pour 100; étant donné que le prix de l'équipement d'un seul moteur est plus réduit que celui de l'équipement à deux moteurs, il y a tout intérêt à se limiter à l'emploi d'un seul moteur (fig. 5).

» Le contrôleur comprend un régulateur et un cylindre inverseur. Le régulateur comporte 5 crans pour la connexion des résistances de démarrage et 3 crans de shuntage des inducteurs pour la régulation de la vitesse. Il ne comporte pas de freinage électrique. Le cylindre inverseur permet la marche arrière. En outre, un circuit auxiliaire dérivé sur les deux pôles d'alimentation permet de réaliser le fonctionnement suivant :

» En cas de disjonction en cours de marche, il est nécessaire de ramener la manette du contrôleur au zéro pour pouvoir assurer le réenclenchement automatique, lequel ne peut se faire qu'au cran 1, le zéro étant dépassé. On est donc obligé ainsi, après toute coupure de courant, de passer par toute la gamme des résistances, afin d'assurer un démarrage correct. En deuxième lieu, la coupure du disjoncteur ne se produit au retour de la manette du régulateur qu'entre le cran 2 et le cran 1, ce qui permet au conducteur d'obtenir la gamme des vitesses dans les deux sens autant de fois qu'il le désire entre les crans 2 et 8.

» Le régulateur est actionné à la main à l'aide du levier qui sert sur les omnibus thermiques à manœuvrer le changement de vitesse. L'inverseur de marche est commandé directement par une manette à main accolée au volant de direction de la voiture.

» Le conjoncteur-disjoncteur déjà signalé coupe le courant sous l'action du régulateur, comme il a été dit plus haut, au moyen d'un relais à maximum en cas de surintensité et, en outre, peut être actionné au moyen d'un interrupteur à pédale manœuvré par le pied du machiniste et qui joue le rôle de débrayage dans les omnibus thermiques.

» En outre, il existe un inverseur de polarité monté sur le toit de la voiture et commandé par une manette traversant le toit. Cet inverseur a pour but, quelle que soit la polarité de chacun des fils d'alimentation, de faire fonctionner tout l'équipement avec la même polarité.

» Un coupleur de secours permet d'amener le courant à la voiture dans le cas où celle-ci est trop éloignée de la ligne aérienne pour pouvoir prendre le courant au moyen de sa perche.

» Enfin, une série d'appareils de mesure : voltmètre, ampèremètre, sont placés sous l'œil du machiniste.

» Comme il a été dit plus haut, le mouvement est transmis depuis le moteur jusqu'au pont arrière par un arbre à cardans. Le pont arrière comporte un différentiel à engrenages d'angle avec

couple conique et une démultiplication dans les roues au moyen de pignons avec couronnes à denture intérieure solidaires des roues motrices.

» La direction, comme sur les omnibus thermiques, est irréversible : vis sans fin et secteur.

» Le châssis possède deux freins : frein de mécanisme commandé par pédale et freins sur roues arrière, chacun des deux freins agissant dans les deux sens de marche.

» Le poids de l'ensemble du châssis est à peu près le même que celui des omnibus thermiques ordinaires, le poids du moteur à explosion et de la boîte de changement de vitesse étant à peu près compensé par le poids du moteur électrique et de ses accessoires.

» Les résistances de démarrage sont placées sous le capot où se trouve le moteur à explosion.

» Ce châssis, dont l'équipement électrique a été étudié avec l'excellente collaboration de la Compagnie française Thomson-Houston, a été présenté pour la première fois à l'Assemblée générale technique de l'Union des Voies Ferrées d'Intérêt local et des Transports publics automobiles de France, en octobre 1921. Depuis, la Société des Transports en Commun a réalisé un certain nombre d'essais sur la ligne d'Enghien à Montmorency, c'est-à-dire sur une ligne dont le profil est très accidenté et présente, dans le sens d'Enghien à Montmorency, une rampe presque continue atteignant, en plusieurs points, 4 à 5 pour 100 (ex: particulier le boulevard de l'Orangerie comporte une pente de 10 pour 100 avec tournant à angle droit). Le tracé présente, en outre, de nombreuses courbes de faible rayon. Les essais ont eu lieu après une période de gel et de dégel, de telle sorte que la route était particulièrement mauvaise.

» Sur la longueur du trajet, qui mesure près de 3 kilomètres, on a marqué durant les parcours d'essais les 16 arrêts intermédiaires actuellement observés par la ligne de tramway en exploitation. Enfin, l'état de la ligne aérienne n'était pas des plus favorables au fonctionnement de l'omnibus à trolley.

» Les mesures ont été réalisées au moyen d'un ampèreheuremètre et d'un voltheuremètre, type O.K.

» D'une façon générale, les marches, dans ces conditions très défavorables, ont donné des résultats très satisfaisants ; malgré l'action de volant produit par l'induit du moteur, le freinage s'est

montré très efficace. La suspension a paru meilleure que celle d'un omnibus thermique, par suite probablement de la diminution de la charge placée à l'avant. En tous cas, les trépidations qu'on constate sur les omnibus thermiques ont été presque complètement supprimées ; le bruit de ronflement du moteur était un peu amplifié par la résonance de la caisse, mais ce bruit est beaucoup plus régulier et moins désagréable que celui du moteur thermique avec sa boîte de vitesses.

» Le démarrage s'est montré très progressif et sans choc.

» La commande à main du levier du contrôleur présente quelques inconvénients ; du reste, elle n'avait été adoptée que comme un pis-aller et la Société des Transports en Commun de la Région parisienne a actuellement à l'étude une commande du contrôleur au pied.

» Les mesures de consommation d'énergie démontrent qu'on peut tabler sur une moyenne de 120 à 130 watts-heure à la tonne kilométrique.

» Ce chiffre est beaucoup plus élevé que celui obtenu sur les tramways, le coefficient de traction des tramways étant évidemment plus faible que pour les omnibus ; cependant, ce résultat, étant donné l'état des voies sur lesquelles les essais étaient faits, paraît des plus encourageants et la Société des Transports en Commun de la Région parisienne continue ses études en vue de perfectionner le matériel d'équipement des omnibus à trolley.

» Toutefois, au point de vue économique, j'estime que les conclusions très optimistes auxquelles aboutit M. Iglésis ne peuvent être prises en considération pour la région parisienne. En effet, les chiffres qui ont servi de base à son étude doivent, pour des applications aux environs de la capitale, être sensiblement majorés.

» Ainsi, en ce qui concerne le remisage, ce n'est qu'exceptionnellement que les omnibus à trolley pourront être remisés dans des dépôts existants ; à défaut, il sera nécessaire d'établir des remises provisoires sur leur parcours normal, ce qui nécessitera des frais assez considérables, ou bien, et c'est là la solution au point de vue exploitation qui est la plus favorable, établir des lignes assez longues, par suite onéreuses pour les parcours haut-le-pied destinés à ramener les voitures à leur remise.

» D'autre part, l'énergie électrique dans la région parisienne revient encore à des prix assez élevés pour les installations de

traction. Les transmissions d'énergie permettront, à l'avenir, de réduire le prix du courant électrique, mais il ne faut pas perdre de vue qu'elles nécessiteront des frais d'installation de ligne et de postes de transformation très élevés et que l'énergie ainsi produite ne sera jamais beaucoup plus économique que l'énergie thermique produite sur place.

» D'un autre côté, le prix des carburants dans ces derniers temps a une tendance à baisser et il est possible que la campagne très active faite en faveur du carburant national permette à l'avenir de bénéficier de prix avantageux. En outre, il est permis d'envisager la mise au point prochaine de moteurs Diesel ou semi-Diesel, dont l'emploi sur des véhicules automobiles permettra l'utilisation de carburants économiques. Je crois personnellement, dans ces conditions, que la zone d'utilisation économique de l'omnibus à trolley, aussi intéressant que soit ce système de traction, sera pendant les années qui vont suivre relativement restreinte. Je reconnais, toutefois, qu'il doit en être autrement dans les régions se trouvant au voisinage de chutes d'eau où le courant électrique peut être produit à des conditions beaucoup plus favorables et où, par contre, l'approvisionnement du carburant doit être assez onéreux.

» Il me paraît difficile de conclure d'une façon générale ; chaque cas d'espèce doit faire l'objet d'un examen spécial. Néanmoins, malgré ces réserves de principe, il est certain que l'omnibus à trolley constitue un système de traction qui mérite de retenir l'attention.

» En terminant, je me permets de faire une observation de détail à mon collègue, M. Iglésis, sur le terme de « trolley-bus » qu'il a employé dans le titre de sa communication. L'emploi de ce terme, de consonnance anglo-saxonne, semblerait laisser croire que la naissance et le développement du « trolley-bus » sont complètement étrangers à notre pays, et je me permets d'insister pour qu'on adopte une dénomination qui rappelle davantage l'origine française de ce système de traction. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Péridier.

QUELQUES APPLICATIONS DES TRANSMISSIONS ÉLECTRIQUES
PENDANT LA GUERRE

Pour les véhicules très lourds mus par moteurs à explosion, les transmissions électriques donnent une souplesse de fonctionnement et une facilité de manœuvre que les transmissions mécaniques par changement de vitesse, embrayage et différentiel ne peuvent toujours assurer. C'est pourquoi il a été fait un grand emploi de transmissions électriques pendant la guerre pour des véhicules tels que camions spéciaux, locomotives blindées d'artillerie sur voie ferrée, chars d'assaut, matériel d'artillerie chenillé.

La description de ces différents types de transmission sera accompagnée de vues cinématographiques.

M. DUTHIL. — « Pendant la guerre, il a été fait un assez large emploi de transmissions électriques pour des véhicules lourds mus par moteur à essence. On a construit successivement, en France, des camions ateliers et des voitures photoélectriques, des locomotives à voie étroite ou à voie normale destinées aux trains d'artillerie par voie ferrée, des chars d'assaut et, enfin, des matériels d'artillerie à chenille.

» L'emploi de transmissions électriques n'était pas nouveau, car depuis longtemps on a songé à utiliser pour les automobiles la souplesse que l'électricité peut apporter lorsqu'elle assure la liaison entre le moteur à essence et les roues motrices.

» Pour ne citer que les essais faits en France, on peut rappeler les voitures Krieger, parues vers 1902. Elles étaient caractérisées, en ce qui concerne la transmission électrique, par une génératrice à courant continu entraînée par le moteur à essence et par des moteurs compound avec couplage série-parallèle, actionnant les roues motrices. L'excitation de la génératrice était triple; cette machine comportait, en effet, une excitation indépendante par batterie d'accumulateurs, une excitation shunt et, enfin, une excitation série démagnétisante réglable par rhéostat.

» Ce système compliqué était bientôt modifié, les moteurs compound remplacés par des moteurs série, qui s'imposent évidemment pour cet emploi comme en traction, et la génératrice, perdant son excitation indépendante, devenait simplement compound, avec un réglage par rhéostat sur l'excitation série. Ce principe devait être plus tard repris dans la transmission Crochat.

» D'autres essais ont été poursuivis à la même époque sur des systèmes analogues, telle par exemple, la transmission Electro-génia, qui était caractérisée par l'emploi d'un seul moteur à deux collecteurs, dont les enroulements induits et les inducteurs pouvaient donner différentes combinaisons par leur couplage et permettre une gamme étendue de vitesses.

» On a essayé également de remplacer la génératrice compound par une génératrice série, avec entrefer conique pouvant être réglé par déplacement longitudinal de l'induit, ce dispositif étant équivalent, comme effet, à un réglage d'excitation.

» Mais de tous ces essais, plus ou moins heureux par leurs dispositions techniques, n'ont donné que peu de résultats au point de vue pratique et commercial. Avant la guerre, seule la maison Crochat construisait avec beaucoup de persévérance quelques camions à transmission électrique et avait mis au point des types de voitures militaires, telles que camions ateliers et voitures de projecteurs. Les transmissions électriques ne constituaient donc pas des applications industrielles vraiment importantes. On ne saurait s'en étonner si l'on considère que la transmission électrique appliquée sur un véhicule apporte une augmentation de poids et de prix très appréciables et que, par conséquent, ce système ne peut se justifier que s'il présente des avantages marqués sur les transmissions mécaniques ordinaires. Or, les transmissions des véhicules industriels d'avant-guerre, tous de poids peu élevé, ont atteint très rapidement des formes donnant toute satisfaction pour les emplois pratiques. C'est pourquoi les transmissions électriques, étudiées à leur apparition pour des voitures de tourisme, puis pour des camions légers, ne pouvaient donner des résultats pratiques ; il a fallu que les besoins de la guerre conduisent à envisager des véhicules très lourds, de 15 à 20 tonnes au minimum, pour que l'attention soit de nouveau portée vers cette application particulière.

» Une transmission électrique doit remplacer les organes de la transmission mécanique, embrayage, changement de vitesse et différentiel, qui constituent la liaison entre le moteur à essence et les roues motrices.

» L'effet du différentiel est assuré, dans la transmission électrique, par l'emploi de deux moteurs électriques qui peuvent prendre des vitesses différentes dans les virages comme en traction. L'embrayage, nécessaire pour le démarrage, est remplacé par un système de résistance faisant croître progressivement l'intensité du courant dans les moteurs. Enfin, les changements de vitesse sont assurés, soit par l'excitation variable des machines, soit par les propriétés combinées de la génératrice et des moteurs électriques, qui peuvent donner différents régimes de marche pour la même vitesse ou pour la même puissance du moteur à essence.

La transmission électrique, grâce aux moteurs série généralement employés, se prête particulièrement bien au fonctionnement à puissance constante et permet de développer aux faibles vitesses de très grands couples. On n'est limité dans ces couples que par l'échauffement des enroulements, mais les surcharges admissibles pendant de courtes durées dans les machines électriques permettent au véhicule de fournir des « coups de collier », qui sont une des propriétés caractéristiques de la transmission électrique.

» On peut, d'ailleurs, en passant, noter que ce fonctionnement à puissance constante se trouve nettement différent des conditions à remplir par les transmissions électriques pour d'autres emplois, notamment pour la propulsion des navires. Dans ce cas, les couples résistants, et par conséquent les puissances mises en jeu, croissent avec la vitesse ; il n'est donc pas étonnant que les solutions pratiques auxquelles on s'est trouvé conduit pour ces différents cas ne soient pas les mêmes.

» A ces avantages des transmissions électriques en général, s'ajoutent une grande souplesse de marche due à ce que le moteur à essence n'est plus lié aux roues motrices d'une façon rigide, une douceur des démarrages qui peuvent être progressifs, et, enfin, une grande facilité de conduite, tous les organes de commande pouvant être manœuvrés sans aucun effort musculaire.

» Par contre, à mesure que les puissances et que les efforts demandés croissent, la construction des transmissions mécaniques, et notamment des embrayages, devient plus difficile, leur manœuvre plus pénible, et c'est pourquoi on s'est trouvé conduit à adopter des transmissions électriques dans les engins de guerre que nous allons décrire.

» Les transmissions électriques employées peuvent être ramenées à deux types, suivant qu'elles s'appliquent à un véhicule comme un camion ou une locomotive, dans lequel la direction est assurée par des moyens indépendants de la transmission, ou à un véhicule chenille, dont les changements de direction sont obtenus en imposant aux roues motrices des vitesses différentes.

» La transmission Crochat ayant été la plus employée, c'est celle que nous examinerons tout d'abord pour les véhicules du premier type.

» Elle est caractérisée par l'emploi d'une génératrice compound entraînée par le moteur à essence et de deux moteurs série, type traction, actionnant les roues motrices.

» L'excitation série de la génératrice est réglable au moyen d'un rhéostat shunt et peut être coupée à l'arrêt. Cette mise hors circuit est effectuée par un petit contrôleur dénommé boîte de marche, suivant le schéma de la figure 1. Ce contrôleur est relié mécaniquement à la pédale d'accélérateur du moteur à essence et se trouve, pour l'arrêt à la position, marquée III sur la figure 1.

» Le conducteur, en appuyant sur la pédale d'accélérateur, met le contrôleur à la position II (position intermédiaire de sécurité plaçant l'excitation série en court-circuit), puis à la position I. La génératrice, qui en tant que machine shunt, ne pourrait s'amorcer en débitant sur les moteurs à l'arrêt, commence à fonctionner à partir de ce moment comme génératrice série ; le courant croît progressivement, en même temps que le conducteur, continuant son mouvement, accélère la vitesse du moteur à essence, et fait croître la tension de la génératrice ; celle-ci se trouve alors dans les conditions normales d'une machine compound à caractéristi-

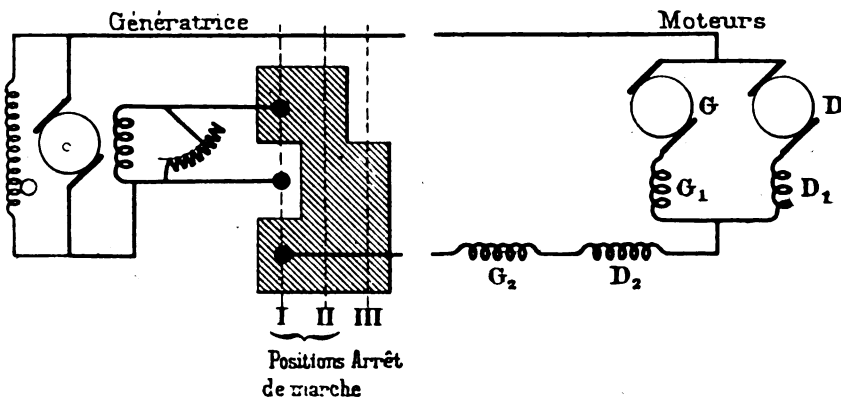


Fig. 1. — Schéma de la transmission électrique Crochat.

que tombante, une augmentation de charge fait décroître la tension et, par conséquent, la vitesse du véhicule.

» Le réglage pour la vitesse du véhicule est double : comme dans une voiture ordinaire, le conducteur peut accélérer le moteur à essence par la pédale d'accélérateur ; cette action a pour effet d'augmenter la vitesse du véhicule, mais sans qu'il y ait une relation obligatoire entre la vitesse du moteur à essence et celle des roues motrices, puisque la vitesse dépend aussi de la charge, c'est-à-dire de la résistance rencontrée par le véhicule.

» Le conducteur peut aussi agir sur l'excitation série de la génératrice au moyen du rhéostat shunt, dans les fortes charges

surtout, lorsque la génératrice doit débiter un grand courant, afin de maintenir sa tension dans les limites de puissance du moteur à essence.

» Ce système est donc très simple. L'appareillage se compose d'un petit contrôleur qui ne coupe aucun courant en charge et qui peut être établi sans crainte d'étincelle, et d'un rhéostat constitué en prenant quelques plots d'une résistance en fonte. L'action est efficace; le moteur à essence peut être employé à des vitesses variables et notamment à la vitesse minimum pour l'effet à obtenir

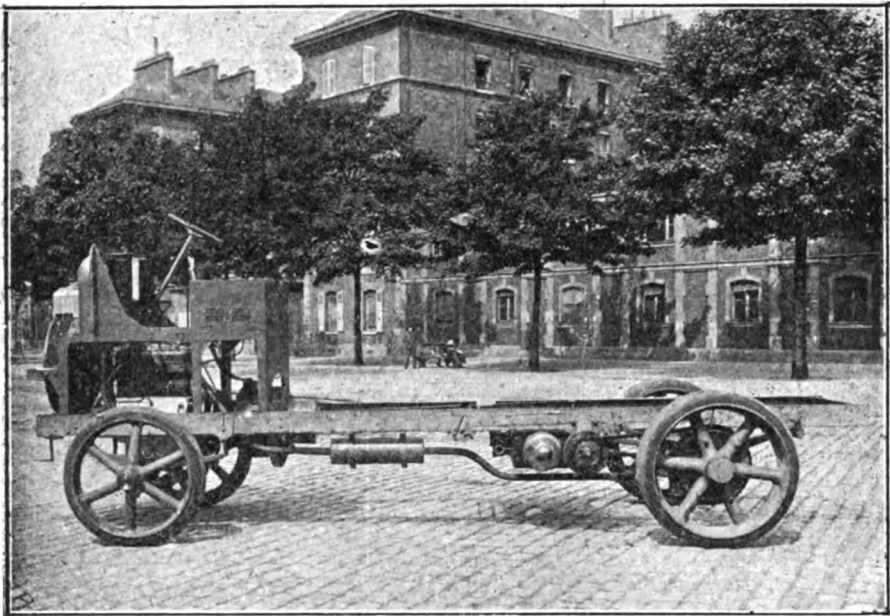


Fig. 2. — Camion à transmission électrique.

(ce qui est parfois une condition de bonne économie). La vitesse du véhicule est facilement réglable; enfin, la transmission se prête à de très grands efforts.

» Deux régimes de marche peuvent être établis par couplage série parallèle des moteurs électriques, en employant un contrôleur manœuvrable lorsque le courant est coupé et qui peut inverser également le sens des connexions des inducteurs des moteurs pour la marche arrière.

» Cette transmission se prête, en principe, au freinage électrique. Dans une pente, il suffit de faire fonctionner les moteurs en génératrices série (par inversion des induits par exemple) pour

qu'ils débitent sur l'induit de la génératrice constituant une résistance. Mais on doit reconnaître que ce freinage n'est pas très progressif et qu'il demanderait à être complété par des jeux de résistances, ce qui apporterait une complication qu'on s'est efforcé d'éviter. Il constitue néanmoins un système de secours et il est très efficace dans un sens, en remplissant l'office de la béquille dont on a pourvu certains tracteurs pour les empêcher, lorsqu'ils gravissent une pente, d'être entraînés brusquement vers la descente si le moteur vient à s'arrêter.

» En pareils cas, les moteurs électriques d'une voiture à trans-

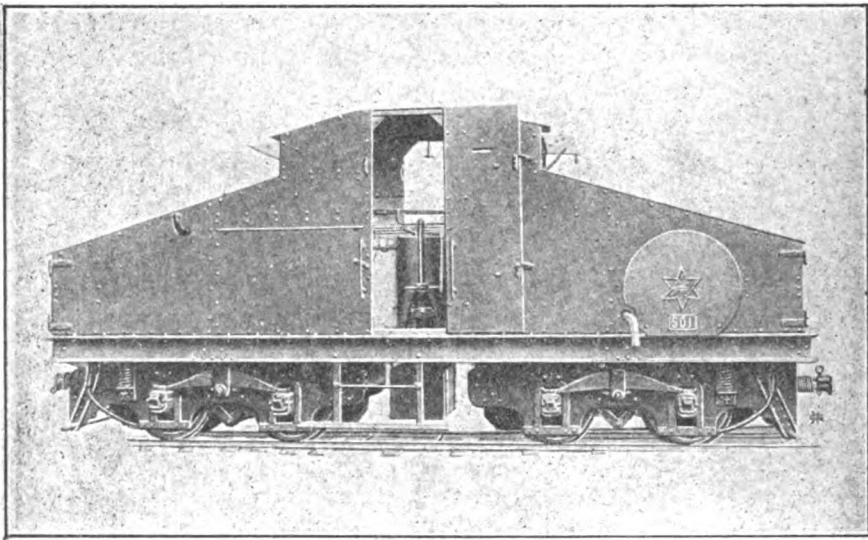


Fig. 3. — Locomotive de 14 tonnes, 80 chevaux, à 2 boggies, pour voie de 0,60 m.

mission électrique se trouvent entraînés dans le sens de la marche arrière et peuvent s'amorcer en débitant du courant sur l'induit de la génératrice (dont l'excitation série est hors circuit). Ils freinent donc d'une manière très énergique et le véhicule abandonné à lui-même ne descend que très lentement la pente.

» D'après ce principe, les établissements Crochat ont construit des séries de camions ateliers et de voitures photoélectriques. La figure 2 représente le châssis d'une de ces voitures. Dans ce cas, la transmission électrique ne s'impose pas d'après le poids des véhicules, ou les efforts demandés, mais le groupe électrogène constitué par le moteur à essence et la génératrice devient utile pour alimenter les moteurs électriques des machines-outils dans

les camions ou les projecteurs des voitures photoélectriques. Aussi ces voitures se sont-elles multipliées.

» **LOCOMOTIVES.** — Des applications plus intéressantes ont été faites aux locomotives pour artillerie lourde. La nécessité de réduire le nombre des locomotives à vapeur immobilisées au service intermittent des trains d'artillerie sur la voie ferrée, le besoin de supprimer le panache de fumée signalant à distance les locomotives à vapeur et de créer un matériel blindé protégé contre

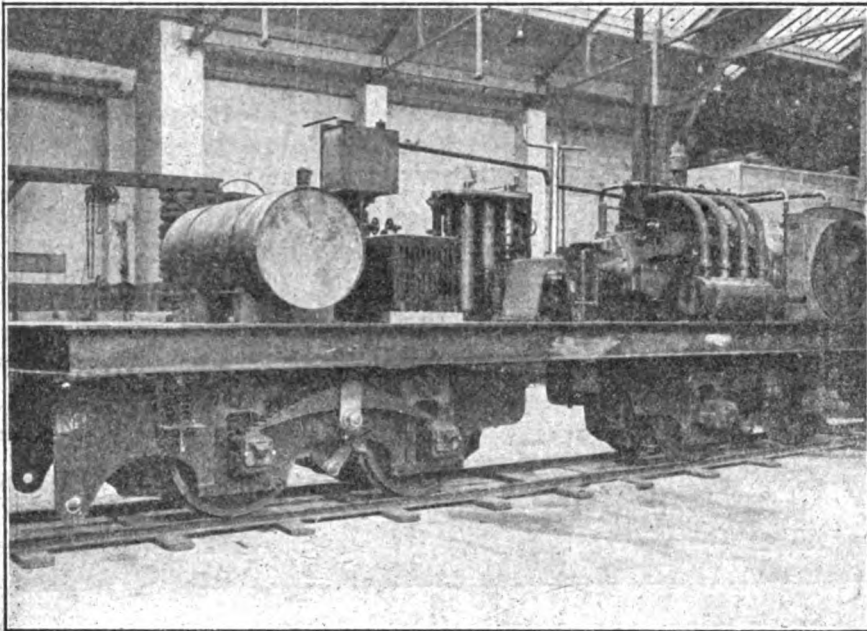


Fig. 4. — Châssis de locomotive de 14 tonnes.

les petits éclats d'obus, ont conduit à la construction de locomotives nouvelles mues par moteur à essence.

» La Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt a construit, pour l'artillerie, trois types de locomotives à transmission Crochat, répondant aux caractéristiques suivantes :

» 1° *Locomotives* de 14 tonnes, pour voie de 0,60 m à deux boggies (voir fig. 3 et 4).

» Ces locomotives, dont la construction a accompagné celle des chars d'assaut, ont reçu le même équipement électrique que les chars comme moteurs et génératrice. Elles sont mues par un moteur à essence de 80 chevaux. La génératrice est pourvue du

double enroulement induit, dont nous reparlerons à propos des chars et qui donne deux régimes de marche.

» Ces locomotives peuvent remorquer un train de 85 tonnes à la vitesse de 15 km:h en palier. Il en a été construit 200.

» 2° *Locomotives de 22 tonnes* à deux essieux, pour voie normale.

» Ces machines, plus puissantes que les précédentes, sont mues par un moteur à essence de 120 chevaux. Elles peuvent remorquer un train de 220 tonnes à la vitesse de 15 kilomètres à l'heure ; 130 machines de ce type ont été construites.

» 3° *Locomotives de 44 tonnes* à deux boggies, pour voie normale.

» Elles possèdent deux moteurs à essence du type précédent, de

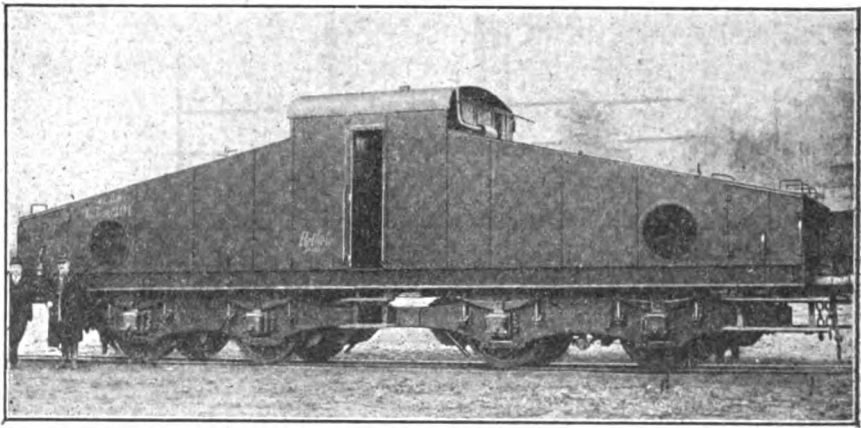


Fig. 5. — Locomotive de 44 tonnes, 240 chevaux, à 2 boggies, pour voie normale.

120 chevaux chacun, et deux génératrices alimentant chacune un groupe de moteurs. Les deux groupes électrogènes ainsi constitués ne sont pas entièrement indépendants. Ils doivent fonctionner ensemble, notamment pour les démarrages ; aussi a-t-il fallu prendre quelques précautions spéciales afin d'égaliser leur marche. Les deux moteurs à essence sont alimentés chacun par leur carburateur normal, sans qu'on ait pu employer un carburateur unique, en raison de l'éloignement des moteurs, mais les vannes de réglage de ces carburateurs sont commandées par la même pédale d'accélérateur. Une tuyauterie d'équilibre réunit, en outre, les conduites d'admission des deux moteurs pour égaliser l'alimentation. De plus, afin que les deux génératrices s'amorcent en

même temps, les enroulements série de leurs inducteurs sont montés tous deux en parallèle et parcourus, en conséquence, par le même courant. Grâce à ces deux dispositifs, les groupes électrogènes jumelés fonctionnent dans des conditions semblables.

» Il a été construit 90 locomotives de ce type. Elles pouvaient remorquer un train de 450 tonnes, à la vitesse de 15 kilomètres à l'heure en palier.

» A ces machines, il convient d'ajouter les locomotives *Schneider*, dont la transmission électrique était différente : elle comportait une génératrice à excitation multiple, une partie de l'excitation étant fournie par une petite excitatrice, dont l'excitation elle-même dépendait du courant débité par la machine principale. Il a été construit 70 de ces machines, dont 45 d'une puissance de 200 chevaux, et 25 d'une puissance de 300 chevaux. (1)

» Il eût été intéressant de pouvoir donner les résultats d'exploitation de ces différentes machines, au point de vue de la consommation notamment, et par comparaison avec des machines à vapeur ; mais la plupart de ces modèles n'ont pas été appelés à fournir un service régulier, soit pendant la guerre, soit depuis, dans les emplois qui en ont été faits pour utiliser ces machines, à la reconstruction des voies ferrées en particulier ; de telle sorte que les chiffres qui ont pu être obtenus n'ont pas une grande valeur comparative.

» CHARS D'ASSAUT. — Les chars d'assaut, comme tous les véhicules dits à chenille, ne peuvent être dirigés qu'en donnant aux deux chenilles motrices du véhicule des vitesses différentes. Avec une transmission mécanique, pour effectuer un virage, il faut débrayer une des chenilles et la freiner plus ou moins, suivant le rayon de la courbe à parcourir. La transmission électrique doit permettre d'effectuer cette manœuvre. Il apparaît donc tout de suite que les deux moteurs électriques ne peuvent être couplés qu'en parallèle, puisqu'ils doivent être indépendants. On conçoit facilement qu'on puisse alors modifier leur vitesse ou les freiner par des jeux de résistances et des rhéostats appropriés, mais, pour obtenir ce résultat, M. Colardeau a imaginé un schéma très élégant, qui permet d'obtenir au moyen d'un simple contrôleur, sans résistances, toutes les combinaisons nécessaires en pratique. Je

(1) Pour de plus amples détails sur les locomotives à transmission électrique, voir l'article paru dans la *Revue générale de l'Electricité*, 31 décembre 1921, t. X, p. 957.

dois signaler à ce sujet que c'est à notre nouveau collègue M. Colardeau, spécialiste en matière de transmissions électriques, puisqu'il a étudié les premières transmissions réalisées, que l'on doit tous les dispositifs techniques intéressants des transmissions Crochat appliquées pendant la guerre, et je suis heureux de pouvoir ici rendre hommage aux qualités dont il a fait preuve dans la collaboration qu'il a apportée à l'étude et à la mise au point des engins nouveaux de guerre.

» Le schéma employé pour le groupement des moteurs électriques est représenté figure 1. Les enroulements inducteurs de chaque moteur sont constitués en deux parties, l'une en série directe avec l'induit correspondant, l'autre est parcourue par le courant total qui alimente les deux moteurs.

» Pour effectuer un virage vers la droite, par exemple, on réalise successivement les opérations suivantes :

» 1° L'inducteur G_1 du moteur gauche est mis en court-circuit, ce qui a pour effet d'accélérer ce moteur.

» Cette position de virage convient en pratique pour modifier légèrement la direction de marche sans ralentir l'allure.

» 2° L'inducteur G_1 étant remis en circuit, l'induit D et l'inducteur D_1 sont mis hors circuit et fermés l'un sur l'autre. Le moteur droit, qui reste excité grâce au courant traversant l'inducteur D_2 , est fermé sur la portion de l'inducteur D_1 agissant comme résistance, et freiné. Il tourne donc lentement, tandis que le moteur gauche continue à sa vitesse normale et le char vire très fortement à droite.

» 3° L'effet précédent est renforcé ; l'induit D étant mis en court-circuit, se trouve presque bloqué, et le char tourne à angle droit.

» Ces trois effets se sont trouvés très suffisants pour toutes les manœuvres à réaliser en pratique, sans qu'il ait été nécessaire de les rendre plus progressifs, ce qui eût été possible par l'introduction de résistances supplémentaires.

» Le groupement série-parallèle des moteurs ne pouvant être réalisé, on a cherché néanmoins à obtenir deux régimes de marche. A cet effet, les génératrices étaient constituées avec un double enroulement induit et deux collecteurs pouvant, en principe, être couplés en série-parallèle, mais il a paru préférable d'avoir deux enroulements inégaux, l'un correspondant à une intensité de 260 ampères au maximum et une tension de 200 volts, tou-

jours en circuit, le second pouvant débiter 130 ampères sous 200 volts, étant ajouté au second, pour porter à volonté la tension de la machine de 200 à 400 volts. Le même effet était ainsi atteint, sans que l'on ait à se préoccuper des courants intérieurs qui auraient pris naissance par le couplage en parallèle de deux enroulements légèrement inégaux.

» On doit d'ailleurs reconnaître que cette disposition, qui a donné de bons résultats et qui a été employée également sur les locomotives de 14 tonnes, n'était pas indispensable. La pratique a montré que la gamme des vitesses obtenue avec un seul induit était bien suffisante, aussi en a-t-on tenu compte dans les matériels chenille qui ont suivi les chars d'assaut.

» La figure 6 indique la disposition générale de tous les organes à l'intérieur du char. Le groupe électrogène, constitué par le moteur à essence, la génératrice, les radiateurs et les contrôleurs agissant sur la génératrice, forme un ensemble compact et amovible. On peut remarquer la forme spéciale des radiateurs et ventilateurs placés horizontalement avec des dispositifs particuliers de tyauteries et de pompes pour assurer le remplissage automatique dans toutes les positions que le char pouvait prendre.

» L'entraînement de la génératrice était assuré très simplement par un plateau à tocs accouplé au volant du moteur à essence au moyen de jumelles en cuir frettées d'acier.

» Les moteurs électriques placés à l'arrière attaquaient par une double réduction d'engrenages les barbotins sur lesquels engrènent les chenilles motrices.

» L'appareillage électrique a donné lieu à quelques difficultés, par suite de la règle qu'on s'était imposée de réunir tous les organes électriques autour du groupe électrogène sans admettre de câbles ou d'appareils en d'autres points de la voiture et bien que le poste du conducteur fût placé à l'avant. Il était donc nécessaire de commander à distance tous ces organes.

» Or, les combinaisons à réaliser pour les virages nécessitaient des coupures de courant en charge sous des tensions pouvant atteindre 400 volts. On ne pouvait employer un contrôleur ordinaire, car on sait combien la commande à distance d'un tel appareil est délicate. Il est difficile d'assurer le passage rapide d'une position à une autre et d'empêcher de tenir le contrôleur dans une position intermédiaire. C'est pourquoi on a utilisé des contacteurs Thomson-Houston commandés par des galets roulant sur

un arbre à came, le profil des comes comportant une chute, assez brusque pour que la manœuvre de chaque contacteur fût franche. Ces contacteurs comportaient un fort soufflage magnétique, ils étaient commandés au moyen d'un câble sans fin en acier, s'enroulant sur une poulie, et ont donné de bons résultats en pratique.

» A ce groupe de contacteurs de direction s'ajoutaient des contacteurs d'inversion pour changer le sens de marche des moteurs, puis, sur la génératrice, un petit contrôleur destiné au couplage 200 et 400 volts des enroulements induits, avec une position pour le démarrage du moteur à essence.

» La nécessité de simplifier l'installation avait fait écarter les solutions comportant l'emploi d'un démarreur spécial, et c'est la génératrice elle-même qui, en recevant le courant d'une petite batterie d'accumulateurs de 24 volts, entraînait le moteur à essence pour sa mise en marche. La batterie servait en même temps à l'éclairage et se rechargeait par la génératrice au moyen d'un conjoncteur-disjoncteur et d'une résistance en série, ce qui constituait une solution un peu trop rudimentaire. Comme moyen de secours, pour la mise en marche, on pouvait virer lentement le moteur à bras, et donner cependant un bon allumage par un auto-trembleur Chauvin-Arnoux, qui envoyait, dans le primaire de la magnéto, le courant interrompu d'une batterie auxiliaire de piles.

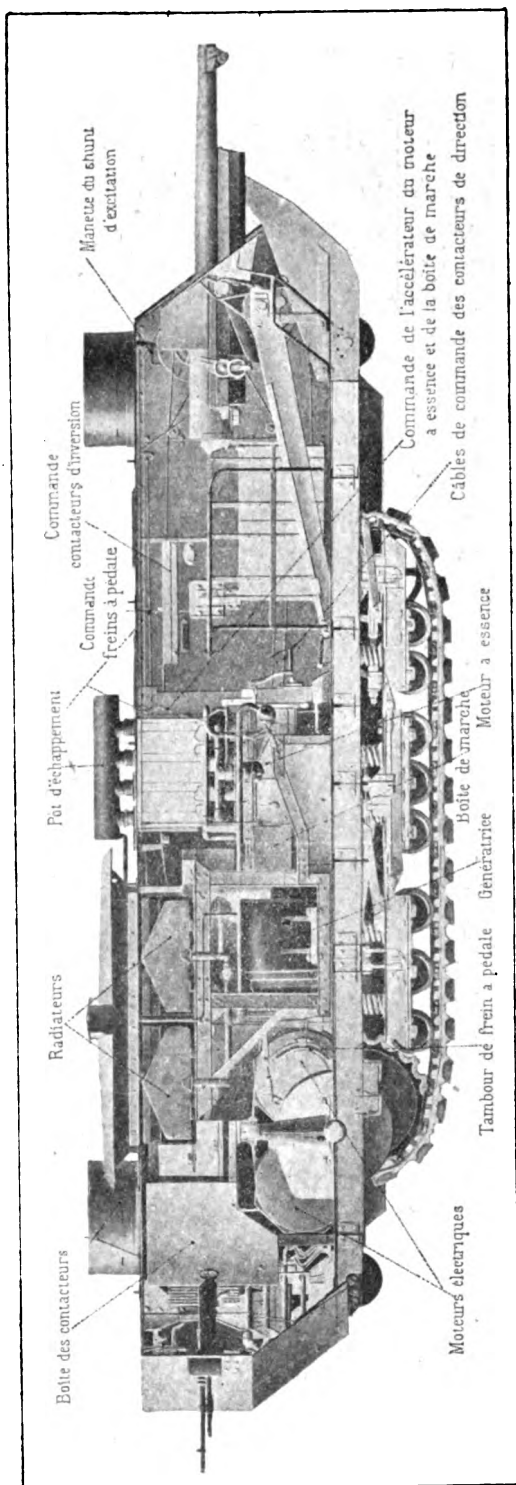
» Sur le contrôleur de la génératrice, une position de freinage était prévue. On n'a eu que peu d'occasions de l'utiliser, car l'action était trop énergique, mais ce système pouvait être employé comme secours pour suppléer au freinage ordinaire par pédales et par levier agissant séparément ou ensemble sur des tambours montés en bout d'arbre des moteurs électriques. On a été conduit à ajouter, après les premiers essais, une prise de courant au groupe électrogène, dite de dépannage, et permettant à un char d'envoyer du courant et, par conséquent, de faire mouvoir à distance un autre char dont le groupe électrogène, par suite d'une avarie, ne pouvait fonctionner. La figure 7 montre un char d'assaut Saint-Chamond en ordre de marche.

» **CARACTÉRISTIQUES.** — On peut indiquer les caractéristiques suivantes pour les 400 chars d'assaut de ce type qui ont été construits :

» *Poids et armement.* — Poids du char sans personnel, ni munition : 20 tonnes environ.

» *Personnel* : 6 à 8 hommes.

COMPAGNIE DES FORGES ET ACIÉRIES DE LA MARINE ET D'HOMÉCOURT
(COMPAGNIE DE SAINT-CHAMOND)



CHAR D'ASSAUT "SAINT-CHAMOND" Modèle 1916 (*Coupe longitudinale*)

Fig. 6. — Char d'assaut de Saint-Chamond, coupe longitudinale.

» Armement : un canon de 75 mm, modèle de campagne, 4 mitrailleuses.

» Approvisionnements : 106 cartouches pour canon de 75 mm ; 10 000 cartouches de mitrailleuses ; 265 litres d'essence.

» *Moteur à essence.* — Type Panhard sans soupapes : 4 cylindres ; alésage : 125 mm ; course : 150 mm.

» Puissance maximum : 90 chevaux à 1 400 tours par minute.

» Poids : 470 kg.

» *Génératrice.* — Puissance : 52 kW.

» Débit : 260 ampères sous 220 volts avec un induit (petite vitesse), ou : 130 ampères sous 100 volts avec 2 induits (grande vitesse).

» Poids : 880 kg.

» *Moteurs électriques.* — Puissance : 26 kW.

» Petite vitesse : 200 volts, 130 ampères, 360 tours par minute, couple 50 mètres-kilogrammes.

» Grande vitesse : 400 volts, 65 ampères, 1 450 tours par minute, 12,5 mètres-kilogrammes.

» Poids d'un moteur avec frein et pignon : 815 kg.

» Réduction d'engrenages entre le moteur et le barbotin : 1/39.

» *Vitesses.* — Vitesse du char en km:h :

1

8,5

12

» Vitesse des moteurs électriques en t:mn. :

234

2 000, vitesse maximum normale.

2 500, vitesse atteinte en cours d'essais.

» *Résultats d'essais.* — Pentès gravies couramment : 50 pour 100 (30°).

» Effort de traction au point fixe enregistré au dynamomètre : 16 tonnes (limite de l'adhérence en bon terrain).

» Coefficient de roulement sur bon terrain (effort moteur) : 80 kg par tonne.

» Consommation par heure de marche : essence, 25 à 30 litres, suivant la nature du terrain ; huile, 3 litres environ.

» Il est bon de signaler que le poids relativement considérable des machines électriques, qui dépasse 2 500 kg pour la génératrice et les moteurs, s'explique par les coefficients très larges de sécurité adoptés pour l'échauffement et pour la résistance méca-

nique. En fait, ces machines auraient pu être employées pour des puissances supérieures.

» Il est intéressant de signaler l'essai fait par la Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt sur un des premiers tanks anglais transformé pour être équipé avec une transmission Crochat. On se rappelle que ces nouveaux engins, qui furent engagés en petit nombre, dans des actions de détail sur le front de la Somme à l'heure où les premiers chars français sor-

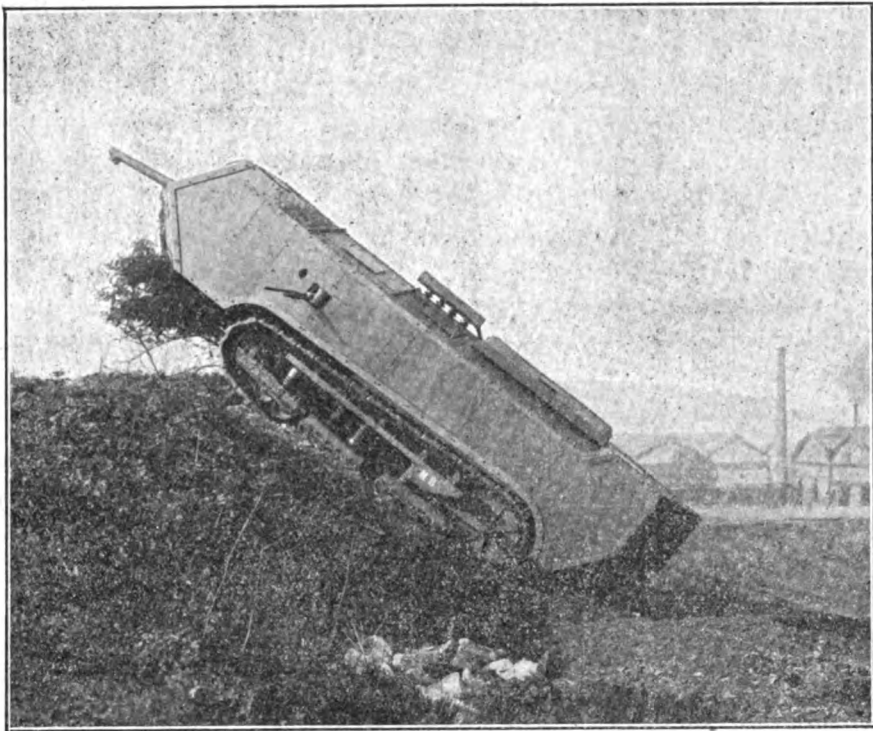


Fig. 7. — Char d'assaut Saint-Chamond, vue extérieure.

taient d'usine, portaient à l'arrière un train de deux roues qui pouvait être braqué pour redresser la marche du tank. Cette disposition entraînait, avec la transmission mécanique, l'emploi d'un différentiel pour permettre aux chenilles de prendre des vitesses différentes sous l'action du train de roues, et compliquait les manœuvres à effectuer pour un virage plus complet ; il fallait, dans ce cas, bloquer le différentiel, débrayer une des chenilles en déplaçant un balladeur et, enfin, freiner cette chenille. Ces manœuvres d'organes nécessitaient l'action simultanée de plusieurs

hommes en plus du conducteur; aussi ces tanks étaient très peu maniables.

» La transmission électrique essayée montra qu'on pouvait supprimer le train arrière des roues et réaliser avec les mêmes tanks des engins d'une conduite très facile et d'une souplesse de marche remarquable, mais cet essai n'eut pas de suites, car, entre temps, un nouveau type de tank avait été mis au point par les Anglais, qui avaient réussi à perfectionner leur transmission mécanique. Il suffit néanmoins à faire regretter le manque de liaison entre les services techniques anglais et français, qui ont travaillé les mêmes questions en s'ignorant mutuellement ; pas un des ingénieurs français qui ont travaillé aux études de ces importantes machines de guerre, n'a connu les projets anglais avant que les premiers tanks aient paru sur le front et, lorsqu'une collaboration a pu être envisagée, il était trop tard, puisque les fabrications de série étaient déjà lancées dans les deux pays.

» L'apparition des tanks anglais a cependant montré par l'expérience qu'on pouvait constituer des véhicules à chenille de poids très élevé, à bâti rigide, sans les systèmes articulés et les ressorts des chars d'assaut français. On pouvait, dès lors, envisager la construction de plates-formes rigides à chenille, pour servir non seulement à des transports de charges et de canons, mais aussi d'affût à des pièces lourdes, et c'est ainsi que le Colonel Rimailho a pu imaginer et créer un type d'artillerie à chenille entièrement nouveau, pour utiliser les qualités vraiment remarquables des véhicules à chenille comme progression en tous terrains et en faisant appel à la souplesse et à la variété des combinaisons que la transmission électrique est susceptible de fournir.

» ARTILLERIE A CHENILLE. — Ce matériel est constitué dans le même esprit qu'un matériel de campagne, en ce qui concerne le groupement des voitures : un avant-train moteur, destiné au transport des munitions, fait mouvoir un arrière-train constituant l'affût du canon. Les deux voitures peuvent se séparer, mais, tandis qu'un canon de campagne privé de son avant-train et de ses chevaux ne peut être déplacé qu'à bras, l'affût du matériel chenille, recevant par un câble le courant de l'avant-train, peut se mouvoir isolément dans les limites de la longueur du câble.

» L'avant-train est constitué par une voiture à chenille rigide et porte un moteur à essence et une transmission électrique du même type que pour les chars d'assaut, mais simplifié quant à

certains détails pour tenir compte de l'expérience : c'est ainsi que l'on a supprimé le second enroulement de la génératrice, une simple gamme de vitesses étant largement suffisante, sans couplage série-parallèle.

» L'appareillage est également plus simple, les contacteurs de direction étant manœuvrés directement du poste de conduite.

» La plateforme de cette voiture est dégagée pour recevoir les munitions.

» L'arrière-train est du même type que l'avant-train comme forme extérieure ; il porte les mêmes moteurs électriques et les

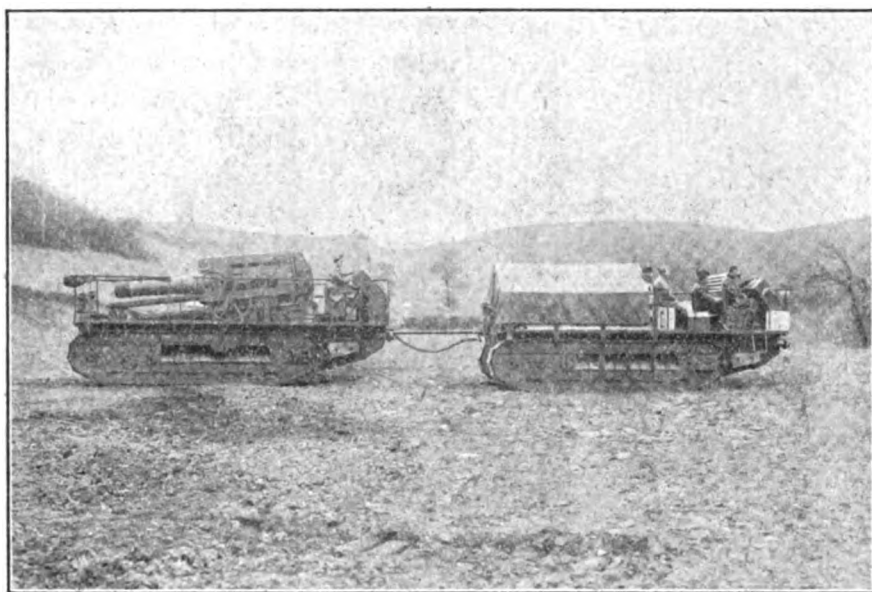


Fig. 8. — Matériel d'artillerie chenille Saint-Chamond.

mêmes organes de direction par contacteurs, mais à l'emplacement du groupe électrogène est réservée une fosse permettant le recul du canon pour le tir sous les grands angles.

» Les deux voitures communiquent par un câble de 50 mètres de longueur s'enroulant sur un tambour qui maintient la tension constante du câble quand les voitures se meuvent isolément.

» Elles peuvent, en effet, progresser toutes deux, réunies par un attelage mécanique, et elles constituent une sorte de train, le courant qui les alimente étant fourni par le même groupe électrogène (fig.8). Un conducteur placé sur la voiture de tête, règle la

vitesse du train et dirige sa voiture ; le second conducteur, placé sur l'arrière-train, dirige sa voiture à la suite de la première.

» Mais les voitures peuvent aussi se séparer et évoluer isolément, pour progresser par avances successives, en mauvais terrain notamment. Les combinaisons sont très variées. Par exemple, après une mise en batterie, un avant-train peut envoyer du courant à un groupe de voitures-canon pour les déplacer successivement.

» Les pièces, sur leur plateforme, ne possèdent aucun dispositif de pointage en direction. C'est la voiture elle-même qui est dirigée sur l'objectif, et le conducteur peut assurer ce pointage avec les organes de direction électrique dont il dispose. Cependant, pour parfaire ce réglage et par mesure de sécurité, on a prévu des engrenages démultiplicateurs qui permettent de faire mouvoir les chenilles en tournant à la main des volants placés sur les côtés de la voiture et qui donnent aux pointages toute la précision nécessaire.

» Cet ensemble est complété par un système de signalisation acoustique empruntant le câble de liaison entre les voitures et qui sert pour les ordres à échanger ; en particulier, pour les demandes et les arrêts de courant de l'arrière-train.

» Comme caractéristiques, on peut indiquer que chaque voiture en ordre de marche pèse 28 tonnes environ, ce poids comprenant pour l'avant-train une charge utile de 8 tonnes de munitions, et pour l'arrière-train 13 tonnes pour la pièce, ce qui correspond à un matériel d'artillerie assez puissant.

» Les organes de la transmission électrique sont presque identiques à ceux des chars d'assaut comme dimensions ; le moteur à essence seul est plus puissant et donne 120 chevaux. Cette puissance ne peut manquer de paraître réduite si on la rapproche du poids total du train qui s'élève à 56 tonnes, mais elle suffit, en pratique, pour toutes les rampes qu'on peut trouver sur une route ; si des obstacles sont rencontrés, chaque voiture les franchit séparément ; aussi ces matériels peuvent-ils, tout comme les chars d'assaut, passer des tranchées, des trous d'obus et gravir des rampes de 30 degrés d'inclinaison.

» CONCLUSION. — De ces essais faits pendant la guerre, nous pouvons tirer quelques conclusions.

» Tout d'abord, nous remarquerons la souplesse et la facilité de manœuvre très grande que la transmission électrique a pu

donner pour des véhicules de ce poids et dont a pu se rendre compte, d'après les films projetés en séance, donnant des vues de ces matériels en évolution.

» Nous noterons ensuite que l'électricité a fourni une solution commode et facile de problèmes, qui auraient pu être résolus peut-être par des moyens mécaniques, mais après essais et mise au point laborieux. Les grands efforts demandés aux engins construits pendant la guerre, plus encore que les puissances mises en jeu, auraient nécessité des embrayages particulièrement robustes et progressifs et des changements de vitesse multiples, dont la puissance aurait dépassé de beaucoup celle des organes semblables de camions et tracteurs automobiles. Une improvisation rapide en cette matière eût très certainement conduit à des déboires tels que ceux que les Anglais ont éprouvés avec leurs premiers chars d'assaut, dont la transmission mécanique, cependant très simple, a dû être entièrement modifiée, sans égard aux retards qui en ont résulté pour la fabrication de ces matériels.

» Car, il ne faut pas perdre de vue que, pour les chars d'assaut notamment, les études ont été conduites avec une rapidité anormale que nécessitait l'état de guerre et les espoirs fondés sur ces nouveaux engins ; l'étude était commencée, en effet, à la date du 1^{er} avril 1916, sans aucune donnée d'expérience sur laquelle on pût s'appuyer, et le premier char sortait d'usine au début de septembre suivant, soit en un peu plus de cinq mois. Ce n'étaient donc point des circonstances favorables à une bonne exécution. Malgré cette précipitation, les résultats ont été des plus encourageants, en ce qui concerne les éléments électriques des chars. Si ces nouveaux engins n'ont pas donné tous les résultats qu'on pouvait en espérer, si les premiers essais ont révélé des imperfections, la cause n'en doit point être recherchée du côté des machines électriques. Les seuls organes qui aient pu prêter à des critiques graves, après mise en service, étaient purement mécaniques et intéressaient le système de chenille articulé, compliqué de ressorts, de bielles et de chariot, qui se trouvait construit pour la première fois en France et d'après des modèles américains plus légers et sur lesquels on ne possédait aucun résultat d'expérience.

» Et cependant, le matériel électrique s'est trouvé soumis à un service particulièrement dur. Ces conditions de fonctionnement prévues dès le début, faisaient craindre à de nombreux techni-

ciens, au moment de la mise en construction, que les chars ne puissent résister à un service prolongé.

» On mettait en avant que, conduit par un personnel qui n'était pas spécialisé dans l'entretien des machines électriques, exposé à tous les agents extérieurs, humidité, poussière, boue, les machines et l'équipement électrique, moteurs, génératrice, contacteurs avec leur complication de connexions, de câbles, devaient donner lieu à d'incessantes réparations qui auraient immobilisé d'une manière permanente la plus grande partie des chars.

» Ces prévisions pessimistes ont été largement démenties par l'expérience. Bien qu'aucune statistique n'ait pu être établie, en raison des conditions tout à fait spéciales d'emploi, empêchant de déterminer le nombre d'heures de marche ou de kilomètres parcourus par chaque voiture, on peut affirmer que les réparations ont été peu importantes. Le nombre de machines retournées aux constructeurs pour avaries graves est resté très minime.

» Enfin, nous devons retenir que la transmission électrique a permis d'adopter des solutions particulières, qu'il n'eût pas été possible de réaliser par d'autres moyens. C'est ainsi que sur les locomotives de 44 tonnes, on a utilisé deux moteurs à essence, par mesure de sécurité et par commodité de fabrication. (Bien que l'on ait pu jumeler directement deux moteurs à essence en certaines circonstances, dans un petit char d'assaut américain, par exemple, construit par Ford, cette solution ne semble pas à recommander sans l'emploi de l'électricité.) Enfin, l'électricité a seule permis la solution très élégante de l'artillerie à chenille Saint-Chamond, dont l'adoption apportait des vues nouvelles sur l'emploi de l'artillerie lourde.

» En terminant, je tiens à exprimer mes remerciements à la Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt, qui a bien voulu mettre à ma disposition les films intéressants des chars d'assaut et des matériels d'artillerie chenille qui ont été projetés au cours de cette communication. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Dutilh.

IL Y A TRENTE ANS

Effets thérapeutiques du courant alternatif (M. le Dr Larat). — Appareil inscripteur de la marche des trains et système de signaux destinés à éviter les collisions (M. H. Pellat). — Présentation d'appareils de chauffage électrique domestique (M. Ed. Hospitaller).

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. HENRIOT - 30, RUE GENÈREUX, PARIS

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Étude expérimentale sur les pertes d'énergie dans quelques diélectriques industriels soumis à une différence de potentiel sinusoïdale (M. A. FRIGON), p. 409. — Sur les conditions imposées pour la fourniture des lampes à incandescence quant à leurs caractéristiques lumineuses et électriques (M. G. PIONNIER), p. 460.

BIBLIOGRAPHIE, p. 464.

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LES PERTES D'ÉNERGIE
DANS QUELQUES DIÉLECTRIQUES INDUSTRIELS SOUMIS À UNE DIFFÉRENCE
DE POTENTIEL SINUSOÏDALE**

M. A. FRIGON. — « INTRODUCTION. — On sait depuis longtemps déjà que les diélectriques s'échauffent, lorsqu'on les soumet à l'action d'un champ électrique variable.

» Le plus souvent, on désigne le phénomène sous le nom générique d'« hystérésis diélectrique », sans bien savoir s'il s'agit d'une hystérésis réelle, d'une viscosité ou si plusieurs causes n'existent pas conjointement.

» Intimement lié au phénomène d'absorption, l'hystérésis diélectrique a fait l'objet d'un certain nombre de recherches expérimentales et d'études théoriques. Malheureusement, le problème est très compliqué, de par sa nature même et à cause de la grande variété et de la complexité des diélectriques qui sont à la portée des expérimentateurs.

» Nous n'entreprendrons pas de faire l'historique de la question et encore moins de discuter les travaux qui ont été faits jusqu'à présent. Cette étude, pour être intéressante, devrait consister

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

en une critique séparée de tous les mémoires importants publiés sur la question. Nous nous contenterons de dire quelques mots sur les méthodes expérimentales qui ont été employées ⁽¹⁾.

» Les premiers expérimentateurs surtout ont mesuré l'échauffement lui-même, soit par l'intermédiaire du phénomène de dilatation, soit par l'élévation de température, soit enfin directement au moyen du calorimètre.

» D'autres ont tiré profit de l'entraînement qui se produit lorsqu'on soumet un corps à hystérésis, libre de se mouvoir, à l'action d'un champ électrique variable dans l'espace.

» Bon nombre ont voulu étudier le phénomène plus intimement et ont établi de véritables cycles d'hystérésis diélectrique par la méthode du point. Tout comme en magnétisme, la surface de la courbe qui représente la charge en fonction du champ, lorsque celui-ci parcourt un cycle de valeurs positives et négatives, est proportionnelle à l'énergie perdue à chaque cycle par hystérésis et par viscosité. Pour le relevé de ces cycles, on a utilisé avec avantage des dispositifs mécaniques qui établissent des contacts au moment voulu, le tube de Braun et même des méthodes indirectes partant de relevés à l'oscillographe.

» On s'est aussi servi, pour des travaux importants, de montages en pont, plus ou moins compliqués, qui permettent de déterminer la valeur de la résistance équivalente à l'hystérésis que l'on désire mesurer. Mais ces ponts, qui fonctionnent bien en basse tension et particulièrement aux fréquences téléphoniques, peuvent difficilement être utilisés aux tensions élevées.

» Depuis quelques années surtout, on a employé avec avantage les méthodes wattmétriques directes, en utilisant soit l'électroinèdre, soit l'électrodynamomètre.

(1) Nous donnons à la fin de ce travail une bibliographie par ordre chronologique, accompagnée de quelques notes. Nous espérons que le lecteur intéressé pourra, de la sorte, se faire rapidement une idée d'ensemble de l'histoire de la question.

On trouvera un bon exposé des méthodes expérimentales employées antérieurement à 1902 dans l'étude de MERCANTON, *Contribution à l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques*, édité par Corbaz et Cie, Lausanne, 1902.

Pour une étude comparative des différentes théories qui ont été émises, voir : GROVER ; The capacity and phase difference of paraffined paper condensers as function of temperature and frequency. *Bulletin of the Bureau of Standards*, t. VIII, 1911.

On trouvera aussi une remarquable bibliographie sur tous les aspects de la question dans RAYNER ; High-voltage tests and energy losses in insulating materials. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, t. XLIX, 1912.

» S'appuyant sur ces travaux expérimentaux, quelques théories ont été émises. La première en date est celle des résidus de Maxwell (2). La plus intéressante parmi les dernières est celle de Décombe (47), qui est conduit à attribuer les pertes dans les diélectriques à une viscosité propre de l'atome. Aucune théorie émise jusqu'ici n'a pu mériter une sanction générale.

» Malgré tous ces travaux, dont plusieurs sont vraiment remarquables, on ne sait encore rien de précis sur la nature du phénomène, et on ne sait que très peu de choses sur ses particularités. On n'est même pas absolument certain qu'il existe pour les corps parfaitement homogènes. Dans le cas des corps hétérogènes, on est à peu près d'accord pour dire que les pertes sont dues, en partie du moins, à une hystérésis soit réelle, soit visqueuse. D'ailleurs, dans son ensemble, le phénomène ressemble beaucoup à celui de l'hystérésis magnétique ; c'est, du reste, à cette similitude qu'il doit son nom. Les quelques lois qualitatives que l'on a pu énoncer ne s'appliquent qu'à des cas particuliers et les lois quantitatives sont encore à établir d'une façon satisfaisante.

» La question est donc loin d'être épuisée et ce n'est qu'en accumulant les constatations expérimentales que l'on parviendra à serrer la vérité de plus près et à fournir aux théoriciens les matériaux nécessaires à l'établissement de lois plus précises. En attendant, les résultats ainsi obtenus peuvent être utilisés pour les besoins de l'électrotechnique, dans les limites imposées par l'étendue des travaux dont ils sont tirés.



» OBJET DE CETTE ÉTUDE. — Nous nous sommes donné pour objet l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques, considérées dans leur ensemble, par une méthode de mesure aussi simple et aussi directe que possible, à des gradients de potentiel élevés, et pour des variations importantes de la tension et de la fréquence du courant utilisé, de la température et de l'épaisseur du diélectrique essayé.

» A cet effet, nous avons utilisé un électrodynamomètre sensible, employé directement, sans circuit de compensation et sans transformateur de tension. Nous discuterons sérieusement cette méthode un peu plus loin.

» Notre but sera atteint si nous réussissons à montrer les

« possibilités » de cette méthode et si les quelques chiffres et les courbes que nous avons obtenus peuvent offrir quelque intérêt théorique et pratique.

» Un grand nombre de matières ont déjà été étudiées par divers expérimentateurs : paraffine, micas, huiles, papiers imprégnés, isolants industriels de toutes natures. Nous nous étions, au début, tracé un programme comprenant l'étude d'un de ces corps complexes et celle de ses parties constituantes. Malheureusement, nous avons été forcé de consacrer tellement de temps à organiser nos expériences et à mettre au point notre méthode de mesure, que nous avons dû nous limiter considérablement.

» Nous avons donc fait une étude des pertes dans les papiers imprégnés utilisés par les fabricants français de câbles électrique ⁽¹⁾. Nous avons, dans nos expériences, fait varier la température entre 0° et 125° C ; la tension, entre 5 000 et 25 000 v ; le gradient de potentiel, entre 1 700 à 22 500 v:mo; la fréquence, entre 20 et 660 p:s ; l'épaisseur du diélectrique, entre 0,6 et 3 mm, avec un rayon de courbure compris entre 3 et 20 mm.



» MÉTHODE DE MESURE. — Comme nous le disons plus haut, les wattmètres électrostatiques et les wattmètres électrodynamiques permettent de mesurer directement les pertes globales dues à l'application d'une différence de potentiel alternative sur un condensateur ayant pour diélectrique celui que l'on désire étudier.

» L'électromètre à quadrants, employé comme wattmètre, offre une grande sensibilité et permet l'étude de petits échantillons. Il n'existe pas cependant sur le marché d'appareils pouvant être utilisés sur des circuits de tension élevée. Il faut avoir recours à des appareils étudiés et construits spécialement, auxquels on donne les caractéristiques appropriées. Des travaux importants ont été ainsi faits sur des isolants industriels et ont donné de bons résultats.

» On peut, plus facilement, utiliser les wattmètres électrodyna-

(1) Nous avons aussi fait quelques essais sur la matière d'imprégnation employée dans la fabrication de certaines de nos éprouvettes, ainsi que sur un condensateur en papier paraffiné isolé pour 40 000 v. Les courbes que nous avons ainsi obtenues sont absolument semblables à celles que nous discutons plus loin.

miques de fabrication courante sur des circuits de haute tension, mais alors leur sensibilité relativement faible exige que l'on opère sur de gros condensateurs ou sur une certaine longueur de câbles électriques.

» Il existe, cependant, une marque d'électrodynamomètre à miroir, d'une grande sensibilité.

» Le Laboratoire central d'Electricité, où nos essais ont été faits, en possède un exemplaire. C'est celui dont nous nous sommes servi ; il présente les caractéristiques suivantes :

» Sensibilité : $2,7 \times 10^{-9} \times R$ watts par millimètre de déviation, R étant la résistance du circuit en dérivation.

» Enroulement série (fixe) :

295 ohms.

0,4 henry.

0,1 ampère.

» Enroulement en dérivation (mobile) :

184 ohms.

0,013 henry.

0,05 ampère.

» Nous avons transformé l'appareil de façon à modifier ces constantes qui sont devenues :

» Sensibilité : $7 \times 10^{-9} \times R$ watts par millimètre de déviation.

» Enroulement série (mobile) :

184 ohms.

0,013 henry.

0,05 ampère.

» Enroulement en dérivation (fixe) :

147 ohms.

moins de 0,2 henry.

0,1 ampère.

» Nous avons adopté le montage indiqué par la figure 1.

» Nous croyons utile, plus loin, de nous étendre un peu sur la discussion des erreurs particulières à cette méthode, et sur les moyens que nous avons pris pour en tenir compte. Nous espérons ainsi éviter beaucoup de tâtonnements et de perte de temps à ceux qui voudraient adopter le même procédé.

» Avant d'entreprendre cette discussion, rappelons, pour fixer les idées, que le problème expérimental à résoudre est le suivant:

» *Mesurer à des tensions qui peuvent varier de 5 000 à 25 000 volts des pertes de l'ordre du dixième de watt, dépensées dans un condensateur d'environ un millième de microfarad. L'intensité du courant est donc de l'ordre du millième d'ampère, et il est déphasé de plus de 89° en avant sur la tension.*

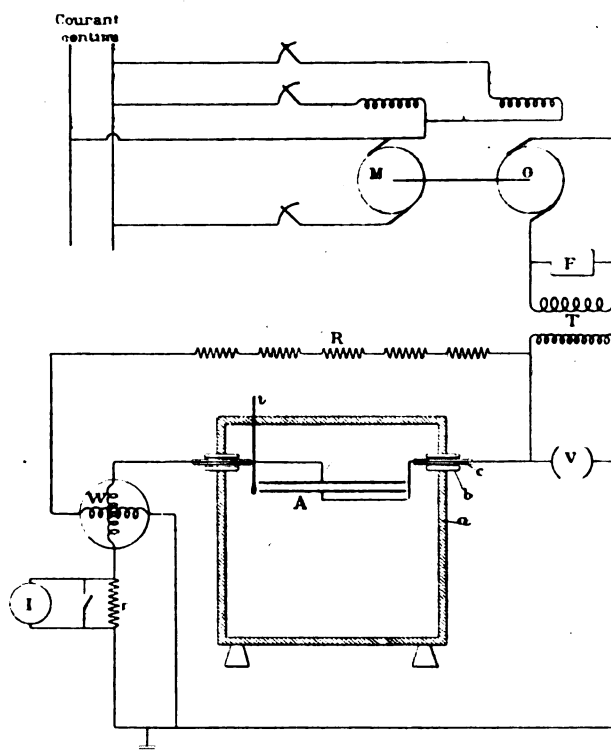


Figure 1. — Schéma d'ensemble du montage pour la mesure des pertes. M, Moteur à courant continu, à vitesse variable, pourvu de poulies de différents diamètres ; G, Alternateur ; T, Transformateur 250-25 000 volts ; a, Etuve chauffée au moyen de résistances, avec contrôle par bobines de self-induction ; b, Tube d'ébonite ; c, Tube de verre ; t, Thermomètre placé à la hauteur de l'éprouvette ; F, Fréquencemètre, système Frahm ; R, Résistance variant de 100 000 à 1 000 000 ohms ; W, Electrodynamomètre ; I, Electromètre Moulin ; r, Résistance aux bornes de laquelle est placé l'électromètre I ; V, Electromètre Abraham-Villard, de 0 à 40 000 volts ; A, Epreuve.

» Toutes nos mesures n'ont évidemment pas été faites dans ces conditions, puisque nous avons enregistré des pertes de plus de 3 watts et des déphasages de 75° et même moins, mais c'est la détermination de ces faibles pertes sous un grand déphasage qui constitue le problème difficile de notre étude.

» DISCUSSION DES ERREURS ⁽¹⁾. — Il y a deux grandes causes d'erreurs particulièrement à craindre. Il faut bien s'assurer que les pertes mesurées sont exclusivement celles qui sont dues au condensateur étudié, et, d'autre part, il faut être bien certain que l'angle de phase entre le courant et la tension au condensateur est bien celui qui agit sur l'électrodynamomètre. (59)

» Tandis que la puissance à mesurer est très faible, celle qui est dépensée par effet Joule dans le circuit potentiel peut atteindre plusieurs centaines de watts. Le montage dit « en amont » était donc le seul possible.

» Nous supposons, d'abord, que nous disposons d'une tension parfaitement sinusoïdale. Considérons, en premier lieu, les pertes qui peuvent s'ajouter à celles que nous voulons mesurer. Dans le montage amont, les pertes par effet Joule dans la bobine série sont indiquées par le wattmètre. Il est facile d'en tenir compte en soustrayant de la lecture, corrigée des autres erreurs, la puissance ainsi dépensée, calculée par la formule RI^2 . Dans nos mesures, même dans les cas les plus défavorables, cette erreur n'atteint pas 0,3 pour 100. Pour presque toutes, elle est absolument négligeable, à cause des faibles intensités et de la résistance relativement peu élevée de l'appareil. Il suffit de bien surveiller les contacts et l'isolement du reste du circuit, pour n'avoir rien à craindre d'autres pertes de ce genre. ⁽²⁾

» Dans la mesure de valeurs aussi faibles, on pourrait aussi craindre des pertes par courants de Foucault dans les pièces métalliques qui composent l'électrodynamomètre. L'appareil dont nous nous sommes servi a été étudié à ce point de vue ; aucune partie métallique ne se trouve à proximité des circuits, toutes les pièces voisines étant en os ou autre matière isolante.

» Les causes qui agissent sur l'angle de phase sont autrement

⁽¹⁾ Cette discussion s'applique surtout aux cas les plus sujets à erreur : faible puissance, grand déphasage. A mesure que les pertes augmentent et que l'angle diminue, l'importance des erreurs devient beaucoup moins grande.

⁽²⁾ A titre de simple curiosité, nous signalons un petit incident de nos mesures. Tout au début, nous avions employé des chaînes pour relier électriquement entre eux les plateaux de condensateurs à air, utilisés pour certaines vérifications. Ces chaînes sont utiles pour relier entre elles différentes parties d'un circuit susceptibles de se déplacer pendant l'expérience. Normalement, elles ne devraient pas présenter d'inconvénients sur des circuits traversés par de faibles courants à haute tension. Nous nous sommes vite aperçu qu'elles introduisaient ici une grande erreur, à cause sans doute de la multiplicité des contacts en série.

importantes. On sait, par exemple, que la self-induction du circuit en dérivation a pour effet de diminuer le courant qui traverse ce circuit et de réduire en quelque sorte la sensibilité. Elle a surtout pour résultat de déphaser ce courant sur la tension principale du circuit, ce qui affecte la valeur du couple moyen produit sur la partie mobile.

» Pour faire disparaître cette erreur, il faut multiplier la lecture par un facteur de correction ; la puissance mesurée a alors pour expression :

$$P = P' \frac{1 + \lg^2 \psi}{1 + \lg \psi \lg \psi'}$$

où P désigne la puissance dépensée dans le circuit principal, y compris les pertes dans le circuit en série ; P' , la puissance indiquée par l'appareil ; ψ , l'angle de déphasage du circuit principal (du condensateur) ; ψ' , l'angle de déphasage du circuit en dérivation de l'appareil.

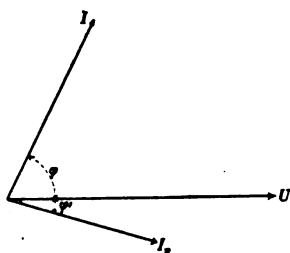


Figure 2. — Diagramme montrant l'influence de la self-induction du circuit en dérivation. U , Tension totale ; I , Courant à travers l'éprouvette ; I_p , Courant dans le circuit en dérivation.

» Si on néglige $\lg \psi'$, cette formule peut se mettre sous la forme souvent plus commode :

$$P = P' - UI \left(\frac{L \omega}{R} \right) \sin \psi,$$

où U est la tension du circuit ; I , le courant à travers de l'éprouvette et L , le coefficient de self-induction du circuit en dérivation.

» Le diagramme de la fig. 2 indique clairement comment les choses se passent.

» Le déphasage étant augmenté, la correction doit être en plus, comme l'indiquent nos formules.

» La self-induction du circuit en dérivation de notre électro-

dynamomètre était de 0,1 henry environ et la résistance du circuit variait de 100 000 et 1 000 000 ohms. Nous pouvons, pour des raisons dont l'évidence apparaîtra plus loin, négliger la self-inductance et la capacité des boîtes de résistances utilisées, qui toutes étaient d'excellente construction et étudiées spécialement à cet effet. Le déphasage dans le circuit en dérivation peut donc être considéré sans effet appréciable.

» Etant donnée la valeur élevée de la tension, il n'y a pas lieu de tenir compte de l'induction mutuelle entre les deux circuits de l'appareil. Mais cette induction mutuelle rend impossible l'emploi d'un shunt pour modifier la sensibilité de l'électrodynamomètre ; nous avons pu nous en rendre compte expérimentalement. Il faut donc avoir recours à la résistance du circuit dérivé pour changer la sensibilité.

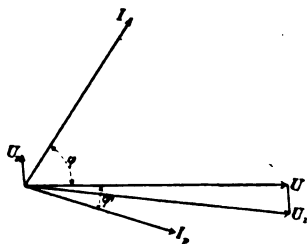


Figure 3. — Diagramme montrant l'influence de la self-induction du circuit en dérivation et du circuit série. U , tension aux bornes de la bobine série ; U_1 , tension aux bornes du condensateur.

» Il est bon de remarquer, de plus, que la tension U du circuit n'est pas celle qui apparaît aux bornes du condensateur essayé, à cause de la présence du circuit série de l'électrodynamomètre. Le diagramme de tout à l'heure prend l'aspect de la figure 3.

» La chute de potentiel U_2 est de l'ordre du dixième de volt, tandis que U n'est jamais moindre que 5 000 volts. L'angle d'erreur est donc très petit et négligeable. Les choses se passent ainsi, à condition cependant que l'on ne tienne pas compte de la résistance r . Cette résistance a atteint 10 000 ohms dans bon nombre de mesures et son effet était très marqué sur les lectures. Nous avons donc dû faire nos mesures en deux mouvements : une lecture du wattmètre avec la résistance r en court-circuit, suivie d'une lecture du courant à l'électromètre. Il y a là évidemment une source d'erreur accidentelle à cause de la lecture non simultanée des deux grandeurs. Cette erreur est faible et il n'y a pas de moyens de l'éviter. L'allure

régulière des courbes que nous avons obtenues, nous justifie d'admettre qu'elle n'a pas eu grand effet sur nos résultats.

» Il existe une autre cause d'erreur dont on n'a pas à tenir compte d'habitude, mais qui exige une attention toute spéciale dans notre cas. Il s'agit de la capacité des boîtes de résistances du circuit de l'enroulement en dérivation de l'électrodynamomètre, et, plus exactement, de la capacité de tout ce qui compose ce circuit, par rapport au sol. Afin de protéger les appareils et l'expérimentateur, et aussi pour faire disparaître toute force électrostatique nuisible, on est conduit à mettre un point du circuit à la terre. L'expérience nous a montré que, dans notre cas, c'était le point commun aux deux circuits de l'appareil de mesure qui était le plus propice à cette fin.

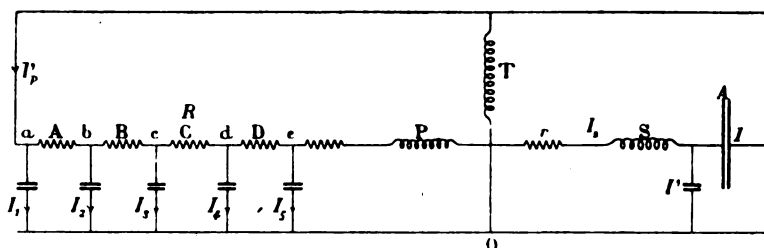


Figure 4. — Schéma de la partie principale du montage de la figure 1, transformé de façon à indiquer la capacité des circuits par rapport au sol.

» Pour les besoins de la discussion, le montage peut être représenté par le schéma de la figure 4, qui n'est qu'une simple transformation de la partie principale de la figure 1, à laquelle nous avons ajouté des condensateurs, pour représenter la capacité du circuit en dérivation et du circuit en série par rapport au sol. Seul le circuit en dérivation nous intéresse pour le moment.

» Si nous remarquons que les courants I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 sont en quadrature sur les différences de potentiel Oe, Od, Oc, Ob, Oa , et que les chutes de tensions dans les boîtes A, B, C, D, E, sont en phase avec l'intensité du courant qui traverse ces boîtes, nous pouvons tracer le diagramme, représenté par la figure 5.

» Le courant I_p qui traverse la bobine du circuit en dérivation devrait être en phase avec la tension totale U ou Oa . On voit que l'effet de la capacité par rapport au sol est de créer un déphasage en arrière, c'est-à-dire de produire le même résultat que si le circuit dérivé avait une certaine self-induction. Si l'on ne prend pas la précaution de disposer convenablement les différentes

parties du montage, cet effet peut, dans certains cas, masquer complètement l'effet principal et rendre négatives les déviations de l'appareil. On peut vérifier le circuit relativement à cette erreur, en opérant à blanc sur de bons condensateurs à air. Les corrections une fois faites, l'appareil doit alors indiquer zéro. Pour faire disparaître cette cause d'erreur, nous avons été forcé de suspendre les boîtes de résistances à une certaine distance du sol, dans une vaste pièce voisine de celle où nous expérimentions.

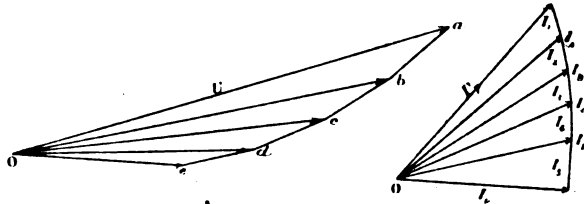


Figure 5. — Diagramme montrant l'influence de la capacité, par rapport au sol, du circuit en dérivation.

» Nous avons dit qu'il y avait une chute de tension de quelques dixièmes de volts dans le circuit-série de l'électrodynamomètre. Cette tension peut créer, par rapport au sol, un effet de capacité dont les conséquences sont indiquées sur le diagramme de la figure 6. Evidemment, en essai normal, cette erreur est négligeable, mais, lorsque nous avons voulu nous servir de résistances en série sur des condensateurs à air pour vérifier nos circuits, comme nous l'expliquerons plus loin, nous avons dû met-

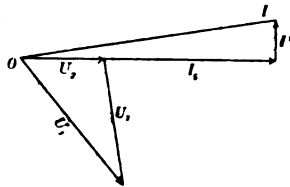


Figure 6. — Diagramme montrant l'influence de la capacité, par rapport au sol, du circuit série.

tre ces résistances du côté haute tension du condensateur, car la capacité, par rapport au sol, de boîtes de gros volume, introduisait une erreur appréciable.

» Jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé de cause d'erreur qui exige une correction des lectures. Cependant, une discussion théorique n'a pas été suffisante et il nous a fallu, expérimentalement, passer beaucoup de temps à vérifier l'exactitude de

nos mesures. Nous avons utilisé à cet effet six plateaux de condensateurs à air, ayant la forme des plateaux de l'électromètre Abraham-Villard de grand modèle, et des résistances élevées à self-induction et à capacité négligeables. Par un emploi judicieux de ces appareils, on peut obtenir le déphasage que l'on veut, dans certaines limites, et atteindre pratiquement la quadrature.

» Ce n'est qu'après de nombreux tâtonnements sur la disposition la plus appropriée à donner aux différentes parties des circuits, pour éliminer les effets de capacité et d'induction mutuelle, que nous sommes arrivé à obtenir des résultats satisfaisants.

» Toutes ces vérifications ont été faites avec la sensibilité maximum de l'appareil. Lorsque nous avons été sûr que tout allait bien, nous avons diminué cette sensibilité de plus de moitié et nous avons de nouveau vérifié le bon fonctionnement du montage.

» Il reste une autre cause d'erreur que nous avons constatée, et que nous avons dû laisser subsister faute de moyens de correction, mais qui, heureusement, n'est pas très importante. Nous voulons parler de la perte par effluves. Ces pertes se produisent principalement sur les bords des armatures de l'éprouvette. Nous verrons plus loin que nous avons adopté une forme d'éprouvette qui réduit les effluves au minimum. Nous ne pouvions pas songer à plonger continuellement nos échantillons dans l'huile ; mais au moyen d'essais effectués rapidement, dans l'air puis dans l'huile, nous avons pu nous rendre compte que l'erreur ne devait pas dépasser 2 à 3 pour 100. Nous sommes donc avertis que nos mesures sont entachées de cette erreur aux tensions élevées. On se rendra compte, par la suite, que ceci n'a pas une grande importance.

» Jusqu'ici, nous avons supposé que la différence de potentiel aux bornes du transformateur était sinusoïdale. Une analyse à l'oscillographe, faite par la méthode ordinaire de résonance, à vide et en régime d'essai, nous a permis de représenter de la façon suivante la force électromotrice de notre source d'énergie :

$$U = U \sin \omega t + 0,025 U \sin 5 \omega t + 0,01 U \sin 7 \omega t + 0,007 U \sin 11 \omega t$$

» Nous signalons ici la nécessité de tenir compte, dans une détermination de cette nature, de la variation de la résistance apparente des bobines de self-induction à mesure que la fré-

quence augmente, ainsi que des pertes dans les condensateurs utilisés pour obtenir la résonance (61). On peut facilement faire une erreur de 50 pour 100 sur l'amplitude des harmoniques, si on néglige ce point.

» Pour des raisons mises en évidence par le développement mathématique, lorsque l'on fait agir une différence de potentiel qui présente des harmoniques sur un circuit qui ne comprend que des capacités, des self-inductions et des résistances, la puissance absorbée par ce circuit est égale à la somme des puissances que produiraient, dans le même circuit, chaque harmonique agissant séparément. On a donc :

$$P = \sum U_n I_n \cos \psi_n.$$

» Pour des raisons identiques, le couple moyen qui agit sur l'électrodynamomètre est égal à la somme des couples, dus à à chaque harmonique, considérée séparément. En se rapportant aux formules déjà énoncées, on a les relations :

$$P' = \sum P'_n \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi_n}{1 + \operatorname{tg} \psi_n \operatorname{tg} \psi'_n}$$

$$P = P' - \sum U_n I_n \operatorname{tg} \psi'_n \sin \psi_n.$$

» Si les circuits contenaient à la fois de la self-induction et de la capacité, cette correction serait très difficile à calculer. Mais, dans notre cas, on peut négliger la capacité du circuit en dérivation ; de plus, la réactance de self-induction est faible par rapport à la réactance de capacité dans le circuit principal. On peut donc admettre, d'une part, que la tangente du petit angle de déphasage du circuit de dérivation est proportionnelle à la fréquence et, d'autre part, que le sinus de l'angle du circuit principal est constant et égal à l'unité. On peut donc écrire :

$$a = \frac{U_n}{U} \quad U_n = a U \quad I_n = n a I$$

$$\sin \psi_n = \sin \psi \quad \operatorname{tg} \psi'_n = n \operatorname{tg} \psi;$$

d'où
$$P = P' - U I \operatorname{tg} \psi' \sin \psi - U I a^2 n^2 \operatorname{tg} \psi' \sin \psi.$$

» Et dans le cas de plusieurs harmoniques :

$$P = P' - U I \operatorname{tg} \psi' \sin \psi (1 + \sum a^2 n^2).$$

» Le calcul numérique montre encore ici que ces erreurs peuvent être négligées. Pour plus le vérifier, nous avons fait une série de mesures en alimentant tour à tour le montage par la source habituelle et par un alternateur, dont la courbe est ex-cel-

lente. Il nous a été impossible de trouver une différence entre les deux cas.

» Les erreurs calculables de nos essais sont donc toutes trop faibles pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte. Elles agissent, d'ailleurs, dans un sens et dans l'autre et s'éliminent en partie. Nous croyons avoir suffisamment réduit l'importance des autres erreurs, par une étude expérimentale soignée des conditions d'essais. Il est donc assez difficile, dans ces conditions, de spécifier numériquement l'ordre de grandeur de la précision de nos résultats. Sous toutes réserves, notre impression est que l'erreur totale ne doit pas dépasser 10 pour 100, y compris celles dues aux autres appareils utilisés pour la mesure de l'intensité, de la tension et de la fréquence. Il est évident que l'erreur maximum possible, sur un point donné, peut dépasser cet ordre de grandeur.

» D'ailleurs, il est juste de ne pas attacher trop d'importance à la valeur numérique des erreurs, *pourvu toutefois que nous soyons assurés qu'elles restent dans des limites admissibles* ; c'est que nos mesures ont surtout pour objet de nous faire connaître l'allure des phénomènes plutôt que la valeur absolue de chaque quantité mesurée. Ce sont donc les courbes que nous établirons qui présentent le plus d'intérêt. Or, les erreurs pour les points situés à la partie supérieure des courbes sont, en général, très faibles et peuvent franchement être négligées, tandis que le peu de précision que l'on obtient dans le tracé de la partie inférieure des courbes rend illusoire tout calcul compliqué qui n'aurait pour but qu'une vague correction d'une erreur de 2 ou 3 pour 100, au maximum.



» PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES. — Nous avons fait nos essais sur des éprouvettes de forme cylindrique, en papier imprégné, tel qu'il est employé par les fabricants de câbles électriques.

» La forme cylindrique a l'avantage de réduire au minimum la périphérie des armatures du condensateur et de diminuer ainsi considérablement les pertes par effluves, pour une surface de condensateur donnée. Elle permet une fabrication facile et robuste de l'éprouvette, et se rapproche, en outre, du mode d'emploi ordinaire de ces diélectriques, ce qui présente certains avantages au point de vue pratique.

» Voici comment ces éprouvettes ont été préparées. Sur un

cylindre, en carton pour les diamètres de 20 mm et en bois pour les diamètres plus petits, on plaçait un papier d'étain mince, destiné à former l'armature intérieure du condensateur. Cette armature était reliée à un conducteur qui sortait par l'extrémité du tube pour établir le contact électrique. Sur ce papier d'étain, ainsi que sur tout le reste du cylindre, on enroulait en spirale une bande de papier de façon à obtenir l'épaisseur voulue ; ce papier étant composé de manille et de pulpe de bois chimique. L'ensemble était alors imprégné dans le vide à une température dépassant 125° C, l'imprégnation durant environ 48 heures. La matière d'imprégnation est principalement composée de résine et de vaseline. La proportion entre ces deux corps n'est pas très bien définie, mais elle peut être d'environ 25 pour 100 de résine et 75 pour 100 de vaseline, dans le cas des deux premiers groupes d'éprouvettes que nous décrivons plus loin.

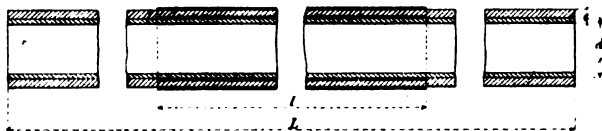
» Une fois le diélectrique préparé, l'éprouvette était, dans la plupart des cas, mise dans un tube de plomb scellé pour empêcher l'humidité de pénétrer dans le diélectrique avant l'essai. Au moment de faire l'essai, une nouvelle armature était placée sur la surface du cylindre en regard de la première. Il est important que les deux armatures se superposent aussi exactement que possible, car nous avons constaté que s'il en est autrement, il se forme sur le diélectrique, en regard de la plus grande surface, une nappe d'effluves qui agit comme une véritable armature. Il est donc impossible de modifier la capacité de l'éprouvette en faisant varier la surface d'une des armatures du condensateur. L'armature extérieure ainsi en place, nous la recouvrons d'un guipage, afin d'assurer un contact aussi parfait que possible entre la couche métallique et le diélectrique. En utilisant un papier d'étain très mince et en appliquant énergiquement le ruban de toile, nous avons obtenu d'excellents résultats.

» Nous remercions très vivement les maisons qui ont bien voulu se charger de la préparation de ce matériel et MM. leurs Ingénieurs, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. Sans leur aide, il nous aurait été impossible de le conduire à bonne fin.

» Nous avons eu de la sorte quatre échantillonnages différents. Voici les caractéristiques des quatre groupes d'éprouvettes correspondants. Nous ne mentionnons ici que les éprouvettes dont il est question dans ce mémoire.

TABLEAU I

Groupe	Numéro de l'éprouvette d'essai	Dimensions				Nombre de couches de papier
		<i>d</i>	<i>e</i>	<i>L</i>	<i>l</i>	
		exprimées en millimètres				
A	1	20	2	70	40	12
	2	20	2	70	40	12
	3	20	1,5	70	40	11
	4	20	2	60	20	12
	5	20	2	70	40	12
	6	6	3	70	40	22
	7	6	3	70	40	22
	8	9	3	70	40	22
	9	9	3	70	40	22
	10	14	3	70	40	22
B	11	14	3	70	40	22
	12	20	3	70	40	22
	13	20	3	70	40	22
	14	40	3	60	20	22
	15	40	3	60	20	22
	16	40	3	60	20	22
	17	20	2	70	40	10
C	18	20	3	70	40	15
	19	20	3	70	40	16
D	20	20	3	70	40	10
	21	20	3	70	40	10



Les éprouvettes des groupes A et B avaient une tension de percement de 55 000 volts, en moyenne.

Les numéros 17 et 21 ont été percés respectivement à 49 000 et 52 000 v. Le numéro 19 a résisté jusqu'à 85 000 v.

Les éprouvettes des groupes A et B ont pratiquement la même composition, mais, comme elles ont été préparées à des époques différentes par un procédé industriel, il est fort possible qu'elles n'aient pas exactement les mêmes proportions de matières premières ou la même qualité de papier. Ces deux groupes se trouvent composés du diélectrique généralement employé pour la fabrication des câbles électriques de basse tension.

La matière d'imprégnation des groupes C et D contenait beaucoup plus de résine que celle des deux premiers groupes.

» CONSTANCE DU PHÉNOMÈNE. — Nous avons commencé nos recherches par une étude de la constance du phénomène. Il était important de savoir, dès le début, si nous devions nous attendre à retrouver des résultats identiques dans des conditions identiques et de savoir comment les pertes par hystérésis dans le diélectrique sont affectées par une application prolongée de la

tension et, par conséquent, quelle influence la durée d'une mesure peut avoir sur les résultats. Nous avons, d'ailleurs, fait bon nombre de déterminations de cette nature à différentes époques, durant nos essais.

» Nous résumons sous forme de courbes (fig. 7 et fig. 8) le résultat de l'application prolongée de la tension sur quelques éprouvettes. On voit que les pertes ne sont pas rigoureusement

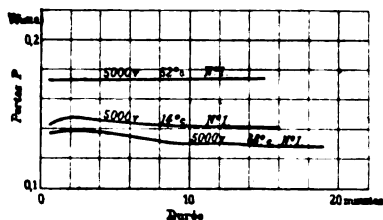


Figure 7. — Variation des pertes en fonction du temps, pour l'éprouvette N° 1.

constantes et que, dans certains cas, elles peuvent se modifier considérablement. Toutefois, on retrouve généralement les valeurs initiales après un repos suffisamment prolongé.

» Il est probable que l'échauffement du diélectrique intervient pour beaucoup dans ce phénomène, mais il ne l'explique pas entièrement cependant ; car, dans bien des cas, la variation des pertes se produit dans un sens opposé à celui que produirait une élévation de température. Le corps subit évidemment certaines modifications. Il est possible, par exemple, que sous l'effet du

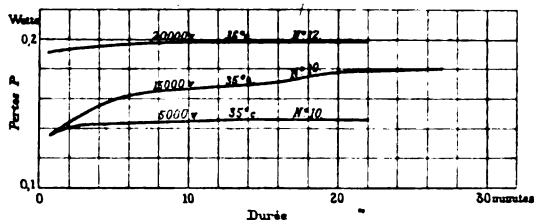


Figure 8. — Variation des pertes en fonction du temps, pour les éprouvettes N° 10 et N° 12.

phénomène de dilatation et sous l'influence des forces produites par le champ électrique, la position relative des divers éléments du diélectrique se modifie. La chose semble assez probable et nous sommes porté à attribuer à la même cause d'autres anomalies que nous avons observées au cours de nos expériences.

» Dans ces conditions, nous avons adopté comme règle, de toujours faire nos lectures aussi rapidement que possible et de

laisser un intervalle d'au moins deux minutes entre chacune d'elles. En général, la lecture d'un point (comportant une lecture à l'électrodynamomètre et une lecture à l'électromètre) prenait environ 45 secondes, étant donnée la période des appareils de mesure et le temps requis pour ajuster la tension et la fréquence. Si, pour une raison quelconque, nous nous attardions plus longtemps qu'une minute et demie, nous interrompions le courant pour reprendre la lecture quelques minutes plus tard. Nous considérons cette précaution comme importante et nous avons obtenu des résultats plus constants après nous y être astreint.

» Le tableau II donne le résultat de mesures ainsi faites dans des conditions identiques, mais à des époques différentes. Les lignes des différents groupes sont dans l'ordre chronologique. Chaque groupe correspond à une éprouvette différente.

» Nous avons consigné dans ce tableau, non seulement des exemples de variations ordinaires, mais aussi des cas extrêmes pour lesquels les valeurs se sont beaucoup modifiées avec le temps.

TABLEAU II

Intervalle	Pertes <i>P</i> exprimées en watts	Valeur en centièmes de la valeur initiale	Capacité <i>C</i> en dix-millièmes de microfarad	Valeur en centièmes de la valeur initiale	Cos ϕ exprimé en centièmes	Valeur en centièmes de la valeur initiale
O	1,95	100	8,70	100	3,17	100
24 heures	1,75	89,7	8,68	99,7	2,88	90,8
72 heures	1,40	71,8	8,67	99,6	2,26	71,2
A	3,23	100	3,16	100	1,29	100
	3,11	96,2	3,16	100	1,24	96,2
A	3,39	100	3,18	100	1,36	100
	3,07	90,5	3,18	100	1,23	90,5
A	3,05	100	3,24	100	1,20	100
	3,14	103	3,24	100	1,23	103
A	1,81	100	2,60	100	2,22	100
	1,70	94	3,02	116	1,79	80,7
A	1,55	100	2,64	100	0,747	100
	1,49	96,1	2,65	100	0,716	96,1
96 heures	1,74	112	2,67	101	0,828	111
A	1,24	100	8,32	100	1,89	100
	1,11	96,0	8,32	100	1,82	96,0
24 heures	0,936	75,5	8,72	105	1,27	67,2
72 heures	0,867	69,9	8,75	105	1,26	66,7
B	4,72	100	3,74	100	2,57	100
	4,85	103	3,74	100	2,64	103

» La deuxième ligne des groupes A correspond à des essais faits quelques minutes après qu'une série de mesures à potentiel variable eut été faite sur la même éprouvette ; la première ligne correspond au point de départ de la série.

» Le groupe B donne les chiffres correspondant à deux essais faits à 24 heures d'intervalle, sur une éprouvette maintenue à une température constante de 34° C.

» On voit que des valeurs déterminées dans des conditions identiques peuvent varier considérablement entre elles.

» Il paraît donc bien inutile de chercher à atteindre une grande précision dans des mesures de ce genre. Il faut se contenter d'étudier l'allure générale des phénomènes. C'est dans cet esprit que nous présentons les résultats de nos recherches.

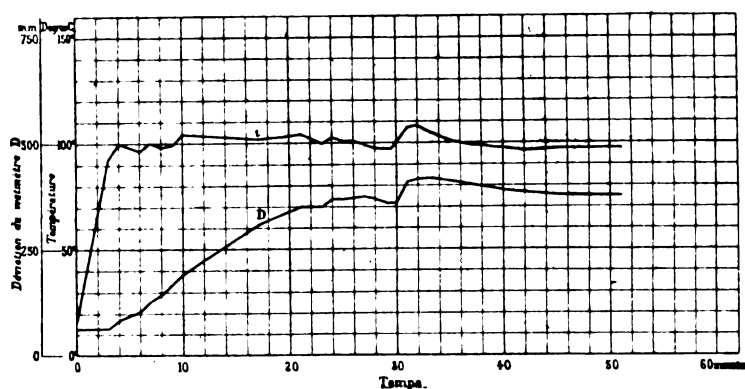


Figure 9. — Retard de la température de l'éprouvette sur la température de l'étuve. La température de régime de l'éprouvette est obtenue, lorsque les pertes restent constantes. Eprouvette N° 2.

» Avant de terminer cette question de l'influence du temps, nous voulons indiquer les résultats d'un essai fait en vue de déterminer le retard de la température d'une éprouvette sur la température de l'étuve dans laquelle elle est plongée (fig. 9). L'étude simultanée de la courbe de température et de celle des pertes (déviations du wattmètre), nous montre que celles-ci atteignent leur valeur de régime au bout d'environ 27 minutes. Cette expérience a été faite avec une éprouvette qui avait deux millimètres d'épaisseur.

» Nous nous sommes inspiré de cet essai et d'autres semblables, pour faire en sorte que le temps alloué pour modifier la

température des éprouvettes en cours d'essai fut amplement suffisant.

••

» **RÉSISTANCE OHMIQUE EN HAUTE TENSION.** — La mesure des résistances se fait généralement à une tension qui ne dépasse pas quelques centaines de volts. Il n'est pas absolument certain, à priori, que la constante R de la loi d'Ohm conserve la même valeur à toutes les tensions, surtout dans le cas de corps complexes comme le sont les diélectriques qui nous intéressent. Afin de nous donner une idée de l'importance des pertes par effet Joule, comparées aux pertes par hystérésis diélectrique aux tensions que nous avons adoptées, nous avons mesuré la résistance ohmique en courant continu et pour des tensions atteignant jusqu'à 17 500 volts.

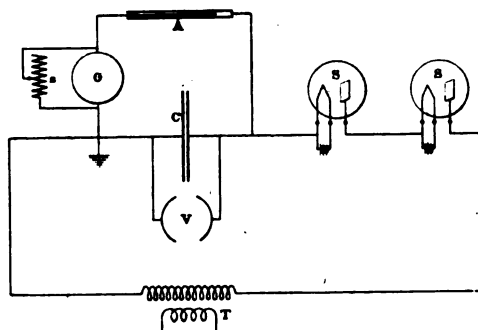


Figure 10. — Schéma du montage pour la mesure des résistances en haute tension courant continu. S, Redresseur thermoionique, pouvant supporter une tension de plus de 10 000 volts entre le filament et la plaque ; C, Condensateur de $0,029 \mu F$, pour une tension de 60 000 v ; E, Electromètre Abraham-Villard, de 40 000 v ; A, Eprouvette ; G, Galvanomètre à cadre mobile, d'une sensibilité de 300 megohms ; s, Shunt ; T, Transformateur, 250 à 25 000 v.

» Nous nous sommes servi à cet effet du montage représenté par la figure 10.

» La tension aux bornes du condensateur est ici continue et égale à la tension maximum du courant sinusoïdal redressé, à condition que le circuit de l'éprouvette absorbe un courant négligeable devant le courant de charge du condensateur. Il nous a donc suffi de vérifier que la mise en circuit de l'éprouvette n'avait aucun effet sur la tension, pour être assuré que le courant mesuré par le galvanomètre était bien continu. Nous avons d'ailleurs fait cette vérification à différentes fréquences.

» Le tableau III donne quelques résultats obtenus. Il indique les valeurs de la résistance en fonction de la température et de la tension.

TABLEAU III

Eprouvette employée	Tension exprimée en volts	Température en degrés centigrades	Résistance d'un mètre de longueur d'éprouvette, en ohms	
N° 3	17 500	17	243	10°
	12 500	55	348	—
	15 000	55	324	—
	17 500	55	182	—
	7 500	95	76	—
	10 000	95	80	—
	12 500	95	81	—
	15 000	95	80	—
	17 500	95	78	—
	15 000	15	146	—
N° 4	15 000	25	146	—
	10 000	45	256	—
	15 000	45	119	—
	10 000	88	1,2	—
	15 000	88	1,4	—
N° 19	12 500	19	84	—
	15 000	19	55	—
	17 500	19	42	—
	12 500	52	59	—
	15 000	52	46	—
	17 500	52	34	—
	7 500	75	32	—
	10 000	75	29	—
	12 500	75	25	—
	15 000	75	23	—
	17 500	75	19	—
	7 500	95	3,3	—
	10 000	95	3,5	—
	12 500	95	3,6	—
	15 000	95	3,7	—
	17 500	95	3,7	—
	7 500	110	1,1	—
	10 000	110	1,4	—
	12 500	110	1,6	—
	15 000	110	1,6	—
	17 500	110	1,5	—

» On remarquera que la résistance diminue fortement lorsque la température augmente ; elle varie aussi avec la tension. Cette particularité, qui peut avoir une certaine importance en elle-même, n'a pas de conséquence appréciable dans notre cas ; la résistance reste tellement élevée à toutes températures et à toutes tensions, que les pertes en RI^2 sont négligeables, devant les pertes par hystérésis que l'on constate dans les mêmes conditions de température et de tension.

» On peut donc admettre, sans crainte d'erreur, que les pertes dont nous parlerons maintenant sont uniquement dues à un effet cyclique.

♦♦

» INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — Nous avons fait plusieurs essais en fonction de la température, mais nous ne donnons ici

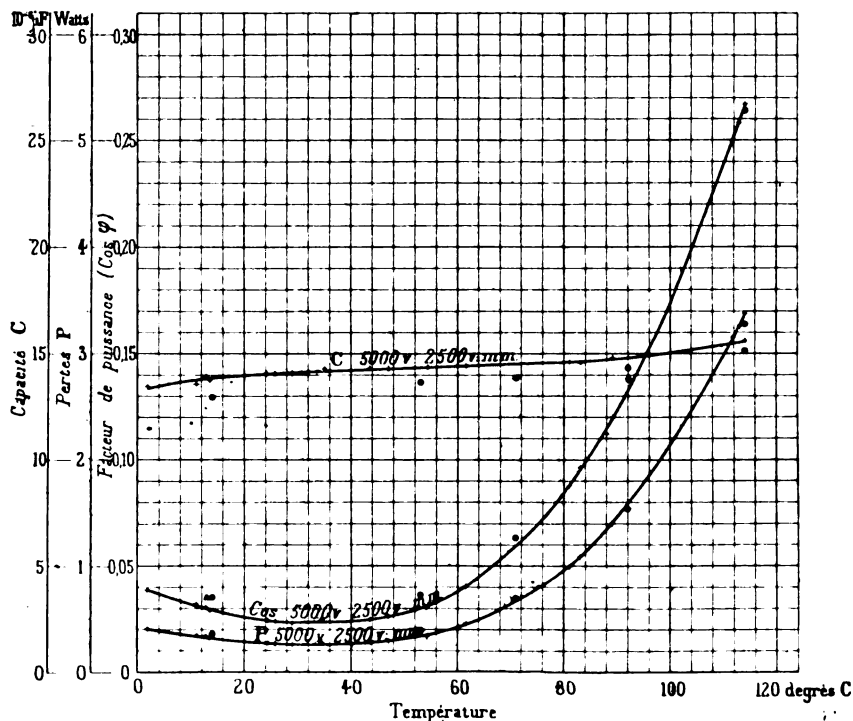


Figure 11. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 1 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v/mm.

que les résultats obtenus sur une éprouvette de chacun des quatre groupes.

» Les courbes de la figure 11 indiquent la variation des pertes,

de la capacité et du facteur de puissance relatifs à l'éprouvette N° 1, en fonction de la température, pour une tension de 5 000 volts et une fréquence de 50 périodes par seconde ⁽¹⁾. Nous opérons donc là dans les conditions de régime d'un câble électrique de fabrication normale et de mêmes dimensions que l'éprouvette.

» La partie de la courbe comprise entre 0° C et 16° C a été obtenue en introduisant un mélange réfrigérant dans l'étuve. Par crainte que l'humidité ne vint affecter les résultats, nous avons entouré l'éprouvette d'un ruban huilé. Le raccord de cette partie de la courbe, avec la partie au-dessus de 15° C, relevée le lendemain, est suffisamment bon pour qu'il n'y ait rien à craindre à ce sujet.

» Des courbes donnant la température et les pertes en fonction du temps (semblables à celles de la figure 9) nous ont permis de suivre exactement la marche du phénomène et de rejeter quelques mesures, faites au moment d'un saut brusque de température et auxquelles on ne pouvait accorder grande confiance. Pour cette expérience, nous avons fait monter la température d'une façon presque continue et très lente; pour tous les autres essais de même nature, nous avons opéré par paliers de température prolongés, et obtenus par une montée rapide.

» Un nouveau cycle de température effectué le lendemain a donné les points que nous avons inclus dans des cercles. Le point dans un triangle a été relevé après une nouvelle journée de repos.

» L'influence de la température n'est pas très marquée jusque vers 60° C ; mais, à partir de ce point, les pertes augmentent très rapidement. On remarquera que les pertes d'énergie et le facteur de puissance passent par un minimum entre 30° C et 40° C. Ce phénomène, que nous avons constaté sur toutes nos éprouvettes, indique qu'il se produit probablement deux actions agissant en sens inverse.

» Nous avons calculé la capacité par la formule

$$C = \frac{I}{2 \pi f U}$$

dans laquelle I représente l'intensité du courant déwatté.

⁽¹⁾ A moins d'indication contraire, tous nos essais ont été faits à 50 périodes par seconde ; les pertes sont exprimées en watts, et la capacité en dix-millièmes de microfarad par mètre de longueur de l'éprouvette.

» La courbe concernant la capacité présente cette particularité qu'elle semble être composée de trois parties distinctes : une courbe jusque vers 25° C; une droite jusqu'à 85° C et une nouvelle courbe assez accentuée. Cette augmentation continue peut provenir d'une modification de la constante diélectrique de la matière isolante, ou bien encore, de l'action mécanique dont nous avons parlé précédemment. Il est bon de noter, cependant, que toute augmentation de la capacité conduit à une diminution du facteur de puissance, à pertes d'énergie égales.

» Un tracé sur papier logarithmique des courbes des pertes et du facteur de puissance (fig. 12) nous a permis de nous rendre

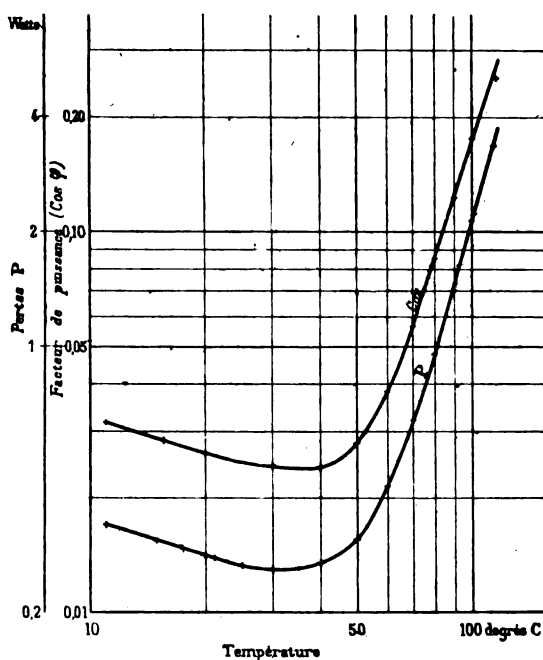


Figure 12. — Pertes et facteur de puissance de l'éprouvette N° 1 en fonction de la température. Coordonnées logarithmiques.

compte facilement qu'elles sont toutes deux composées, approximativement, d'une exponentielle depuis 0° C jusqu'à 25° C, reliée par une courbe plus complexe à grand rayon de courbure, à une seconde exponentielle qui commence vers 70° C.

» L'inclinaison de ces courbes logarithmiques nous indique, de plus, que les pertes et le facteur de puissance varient dans le rapport inverse de la puissance 0,3 de la température, dans l'intervalle de 0° C à 25° C, et qu'elles augmentent, à partir de 70° C.

proportionnellement à la puissance 3,6 pour les pertes et 3,1 pour le facteur de puissance. Ceci peut s'exprimer par les formules suivantes :

» De 0° C à 25° C : $P = m T^{-0.3}$

$$\cos \psi = n T^{0.3}$$

» De 70° C à 110° C : $P = o T^{3.6}$

$$\cos \psi = p T^{3.1}$$

» Il ne faut pas se hâter d'en conclure que les pertes d'énergie

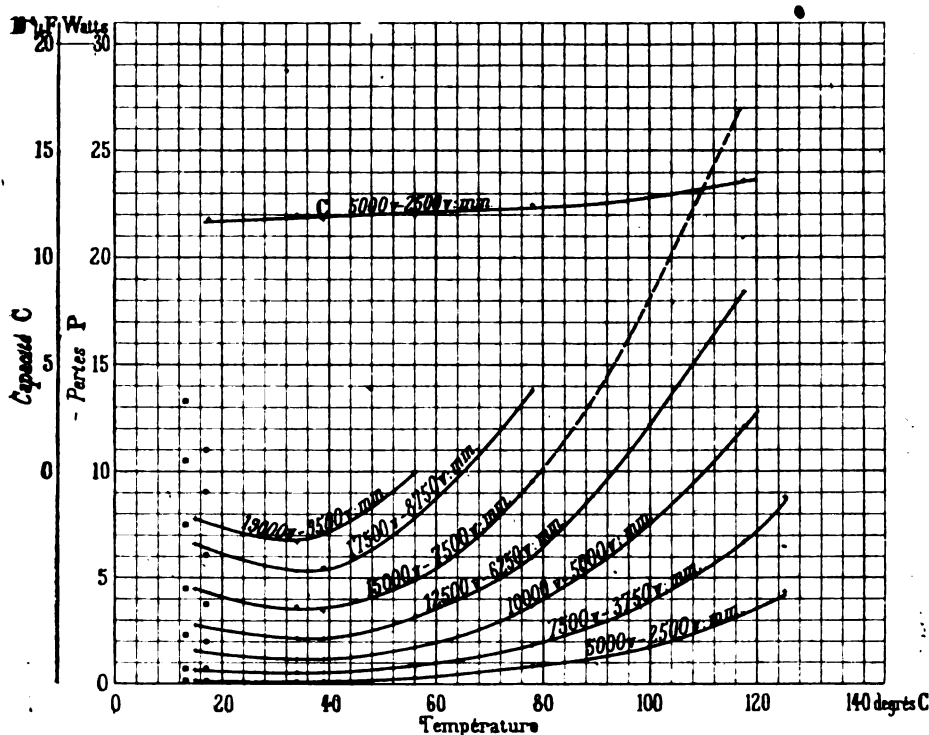


Figure 13. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la température et pour différents gradients de potentiel. Capacité de la même éprouvette en fonction de la température.

dans les diélectriques suivent toujours ces lois. Comme nous allons nous en rendre compte, les points d'inflexion et même les exposants peuvent varier suivant les échantillons. Nous pouvons dire, toutefois, que les résultats obtenus sur l'éprouvette dont il s'agit ici représentent une bonne moyenne.

TABLEAU IV

Tension en volts	Gradient de potentiel en volts par millimètre	Pertes en watts par mètre de longueur d'éprouvette	Capacité par mètre de longueur d'éprouvette en μF	Facteur de puissance exprimé en centièmes	Température en degrés centigrades
5 000	2 500	0,170	11,6	1,85	15°
7 500	3 750	0,650	11,4	3,21	
10 000	5 000	1,52	11,8	4,10	
12 500	6 250	2,79	12,1	4,69	
15 000	7 500	4,49	12,5	5,07	
17 500	7 750	6,50	12,5	5,38	34°
19 000	9 500	7,70	12,6	5,43	
5 000	2 500	0,156	11,9	1,66	
7 500	3 750	0,530	11,7	2,55	
10 000	5 000	1,18	11,8	3,18	
12 500	6 250	2,16	12,0	3,67	39°
15 000	7 500	3,61	12,5	4,08	
17 500	7 750	5,30	12,5	4,37	
19 000	9 500	6,50	12,7	4,64	
5 000	2 500	0,164	11,9	1,75	
7 500	3 750	0,525	11,6	2,55	56°
10 000	5 000	1,21	11,8	3,27	
12 500	6 250	2,14	11,9	3,65	
15 000	7 500	3,43	12,3	4,01	
17 500	7 750	5,50	12,5	4,48	
19 000	9 500	7,10	12,7	4,96	78°
5 000	2 500	0,340	12,2	3,55	
7 500	3 750	0,850	11,8	4,08	
10 000	5 000	1,74	12,0	4,60	
12 500	6 250	3,07	11,1	5,15	
15 000	7 500	4,90	12,4	5,55	100°
17 500	7 750	7,81	12,7	6,41	
19 000	9 500	9,92	12,8	6,81	
5 000	2 500	0,815	12,5	8,25	
7 500	3 750	1,83	12,1	8,55	
10 000	5 000	3,70	12,5	9,43	118°
12 500	6 250	6,00	12,4	9,79	
15 000	7 500	9,55	12,9	10,4	
17 500	7 750	13,3	13,1	10,9	
5 000	2 500	1,79	12,8	17,6	
7 500	3 750	3,88	12,2	17,7	125°(1)
10 000	5 000	7,55	12,8	18,4	
12 500	6 250	12,2	13,4	18,2	
5 000	2 500	3,30	13,6	29,5	
7 500	3 750	6,71	13,2	27,7	
10 000	5 000	12,1	14,0	26,8	125°(1)
12 500	6 250	18,4	14,5	25,0	
5 000	2 500	4,33	14,6	36,0	
7 500	3 750	8,80	14,1	33,8	125°(1)
10 000	5 000	15,4	14,5	31,9	

(1) Les 3 dernières lignes de ce tableau sont relatives à des essais faits après un deuxième cycle de température.

» Le tableau IV et les courbes des figures 13 et 14 résument les mesures faites sur l'éprouvette N° 4. On y voit les courbes correspondant aux différentes tensions, excepté celle qui donnerait la variation de la capacité, laquelle n'est pas beaucoup affectée par la tension.

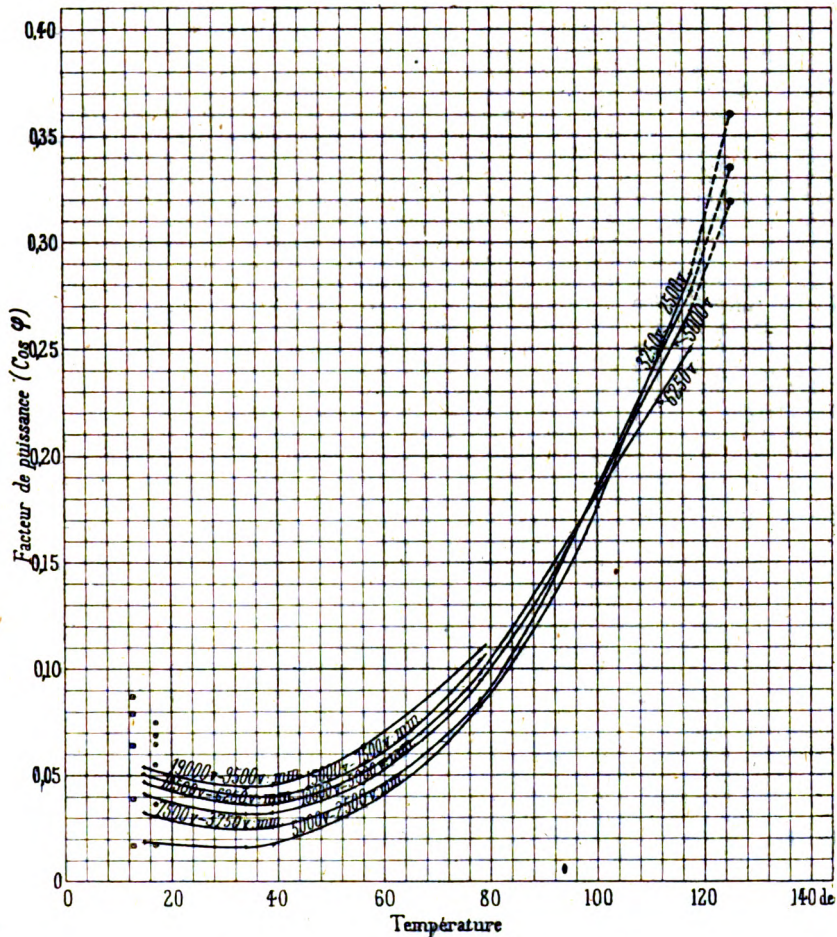


Figure 14. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 4 en fonction de la température, pour différents gradients de potentiel.

» Il est très intéressant de constater que les courbes ont une allure à peu près identique à celles de l'éprouvette précédente à partir de 70° C. On trouve, pour les formules précédentes, pour T un exposant 3,4 pour les pertes et 3,0 pour le facteur de puissance.

» Le point d'inflexion, sur l'échelle des températures, est cependant le plus bas que nous ayons constaté.

» Les points entourés d'un cercle ont été relevés le lendemain ; ceux inclus dans des triangles, trois jours plus tard, après que l'éprouvette eut été portée trois fois à la température de 120° C.

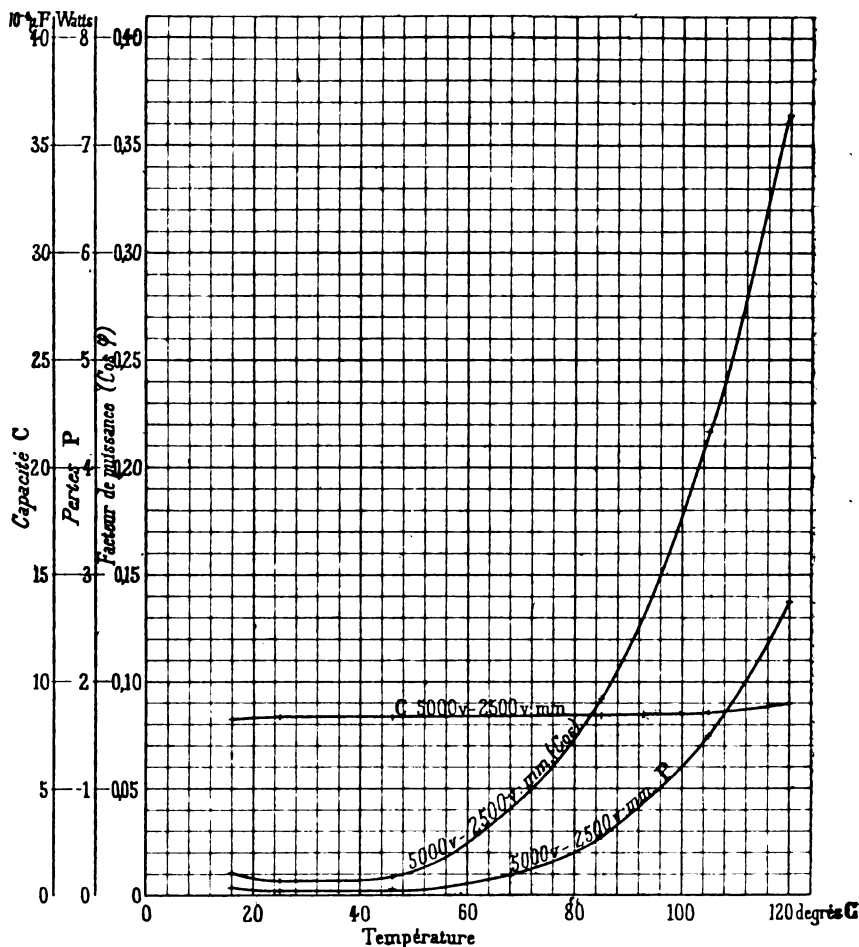


Figure 15. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 17 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm.

» Une particularité intéressante des courbes, concernant le facteur de puissance, est l'inversion de leur position relative aux températures élevées. Nous avons constaté ce phénomène sur plus de la moitié des éprouvettes que nous avons essayées, nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin.

» Les échantillons des séries C et D ont donné des pertes qui

sont plus faibles aux basses températures, mais qui, par contre, augmentent plus rapidement aux températures élevées.

» Par exemple, pour l'éprouvette N° 17 (résultats représentés par la figure 15) nous trouvons un exposant pour T égal à 4,6 pour les pertes à partir de 70° C et à 3,9 pour le facteur de puissance.

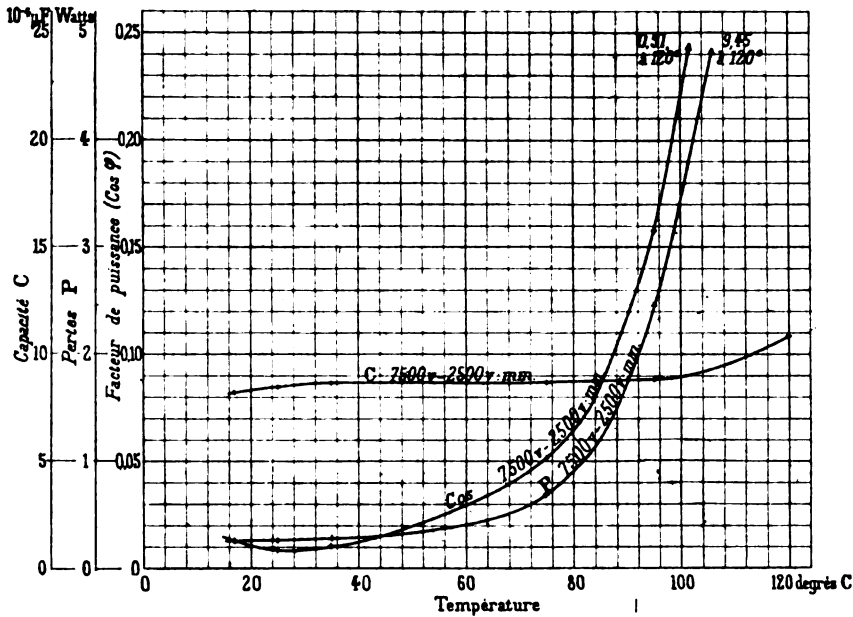


Figure 16. — Pertes, facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 21 en fonction de la température, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm.

» L'éprouvette N° 21 a donné des résultats encore plus accentués (fig. 16). Nous ferons remarquer que cette éprouvette n'avait que 10 couches de papier pour une épaisseur de 3 mm. Elle avait donc moins de consistance que les autres et, par conséquent, elle se prêtait mieux au déplacement des divers éléments de la masse du diélectrique.

••

» INFLUENCE DE LA TENSION. — Si nous représentons en fonction de la tension les valeurs indiquées au tableau IV, on trouve les courbes représentées dans les figures 17, 18, 19.

» Les pertes augmentent rapidement avec la tension. Comme nous pouvons le constater sur le tracé à échelle logarithmique

de la figure 20, les courbes ne sont pas des exponentielles parfaites, mais elles s'en approchent beaucoup, surtout à partir de 7 500

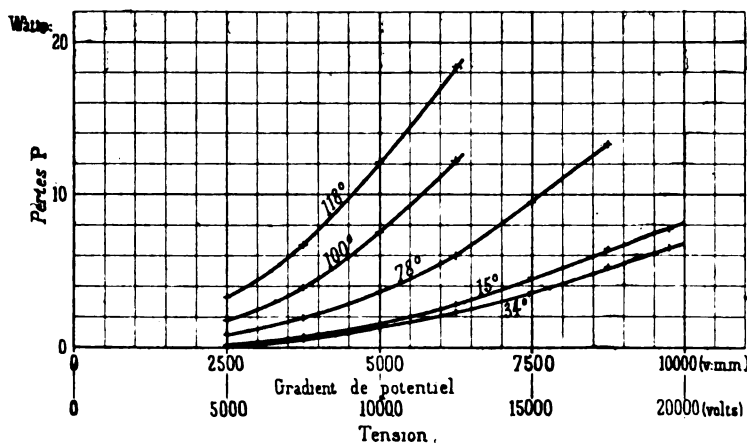


Figure 17. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à différentes températures.

volts environ. On trouve, en gros, que les pertes peuvent être représentées par la formule :

$$P = m U^n$$

dans laquelle on donnera à l'exposant n les valeurs suivantes pour les différentes températures :

2,7	pour 15° C
2,6	— 34° C et 39° C
2,5	— 56° C
2,3	— 78° C
2,2	— 100° C
1,9	— 118° C

» On suppose, d'habitude, les pertes par hystérésis diélectrique proportionnelles au carré de la tension. On voit que cette supposition n'est pas très exacte, tout au moins pour les matières que nous avons étudiées, et que, de plus, la température intervient pour une large part dans l'expression de ces pertes. Nous trouverons plus loin d'autres causes qui peuvent affecter la valeur de l'exposant.

» Nous retrouvons ici (fig. 18), au sujet du facteur de puissance, l'influence de la tension aux différentes températures, sur

laquelle nous avons déjà attiré l'attention. Cette inversion de la pente, lorsque l'on passe de 100° C à 120° C, est assez curieuse. Elle

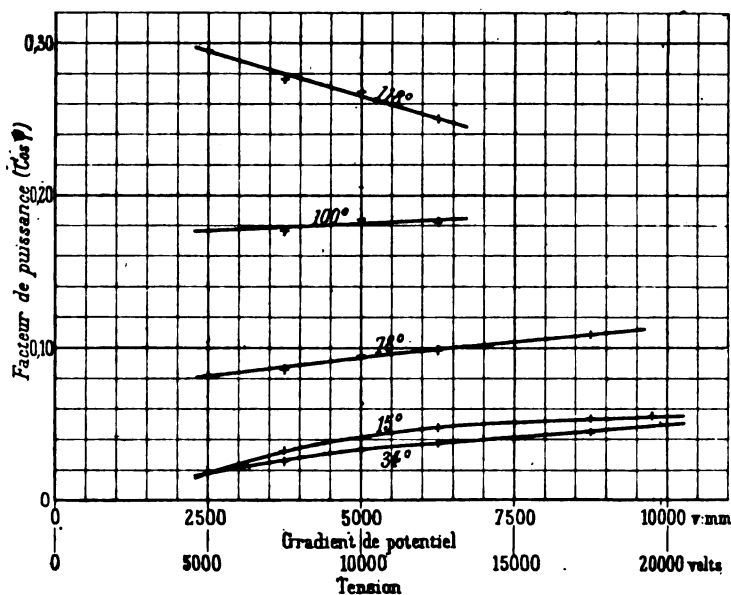


Figure 18. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à différentes températures.

n'est pas générale, mais nous l'avons constatée sur plusieurs

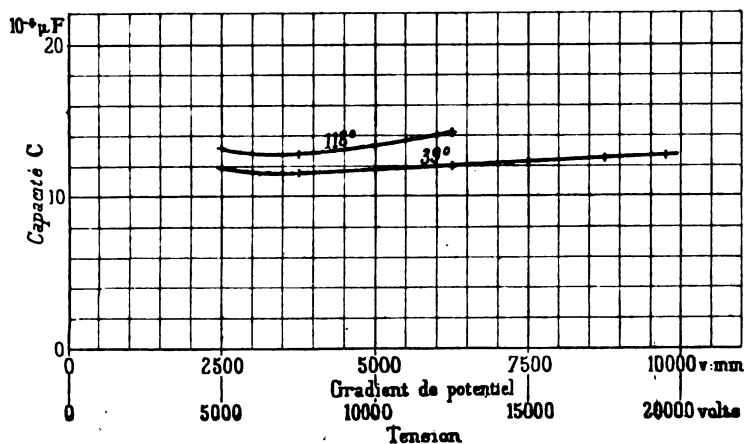


Figure 19. — Capacité de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à 39° C et à 118° C.

éprouvettes. Dans certains cas, l'inclinaison reste dans le même sens à toutes les températures ; dans d'autres cas, la courbe pré-

sente un minimum. Il ne s'agit pas d'un phénomène passager, car, pour une éprouvette donnée, il se reproduit identiquement lorsque l'on répète l'expérience.

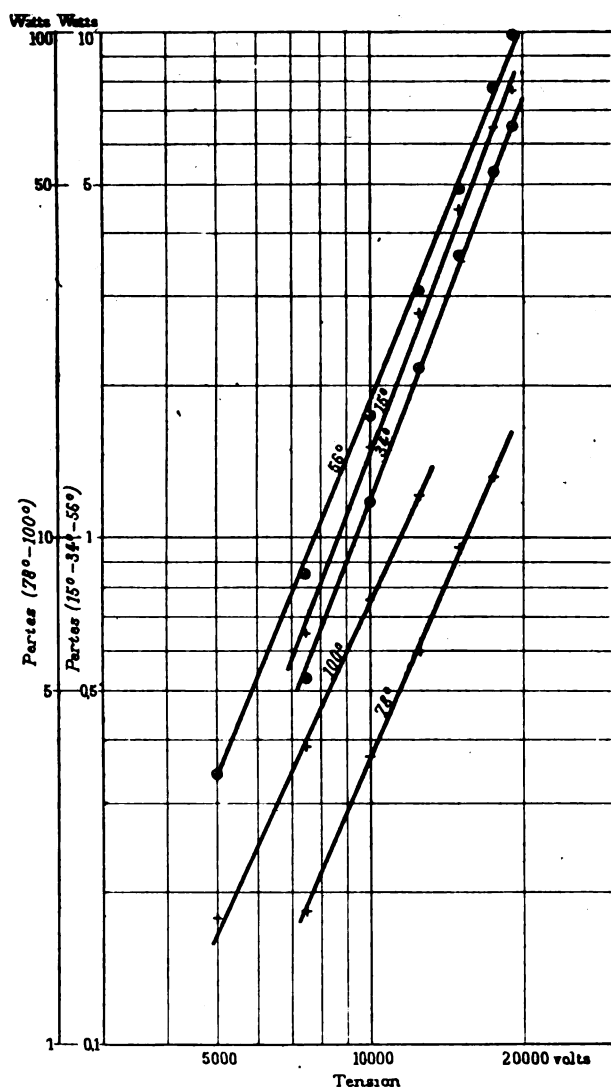


Figure 20. — Pertes de l'éprouvette N° 4 en fonction de la tension, à différentes températures. Coordonnées logarithmiques.

» La capacité diminue d'abord puis augmente avec la tension (fig. 19). La différence entre les valeurs extrêmes n'est cependant pas très grande

» Les figures 21, 22, 23 et 24 donnent les résultats obtenus sur les

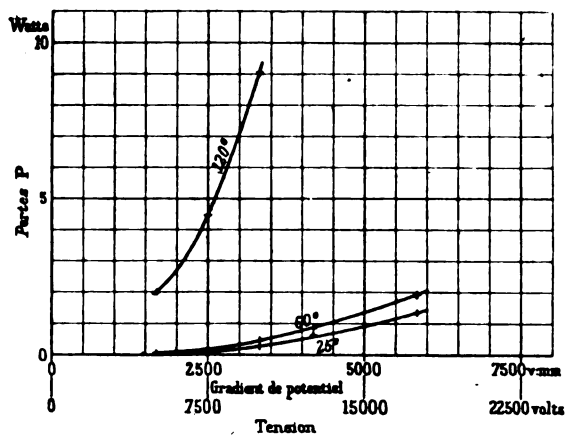


Figure 21. — Pertes de l'éprouvette N° 19 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

éprouvettes N° 19 et N° 21. Ces éprouvettes étaient constituées

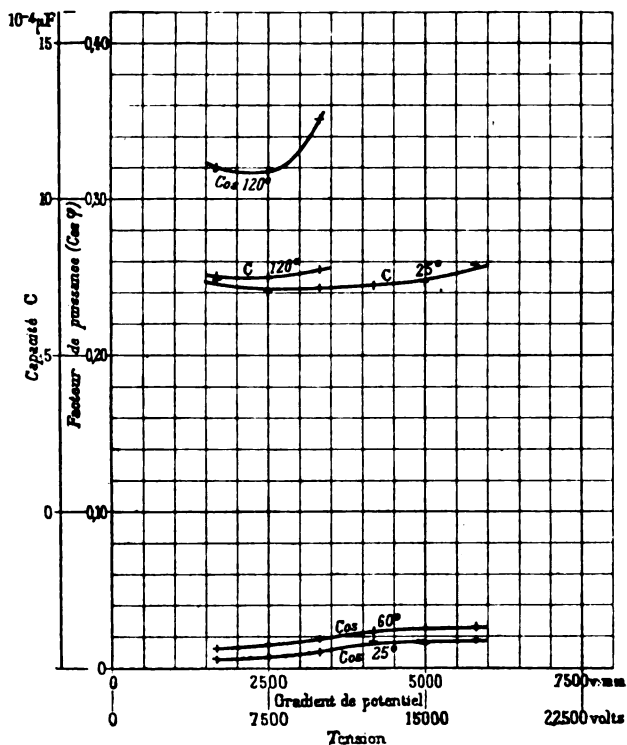


Figure 22. — Facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 19 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

par un nombre de couches de papier relativement plus faible que

l'éprouvette N° 4, la matière d'imprégnation contenait beaucoup plus de résine et l'épaisseur du diélectrique était de 3 mm au lieu de 2 mm. Il ne faut pas s'étonner si les résultats sont un peu différents en valeur absolue.

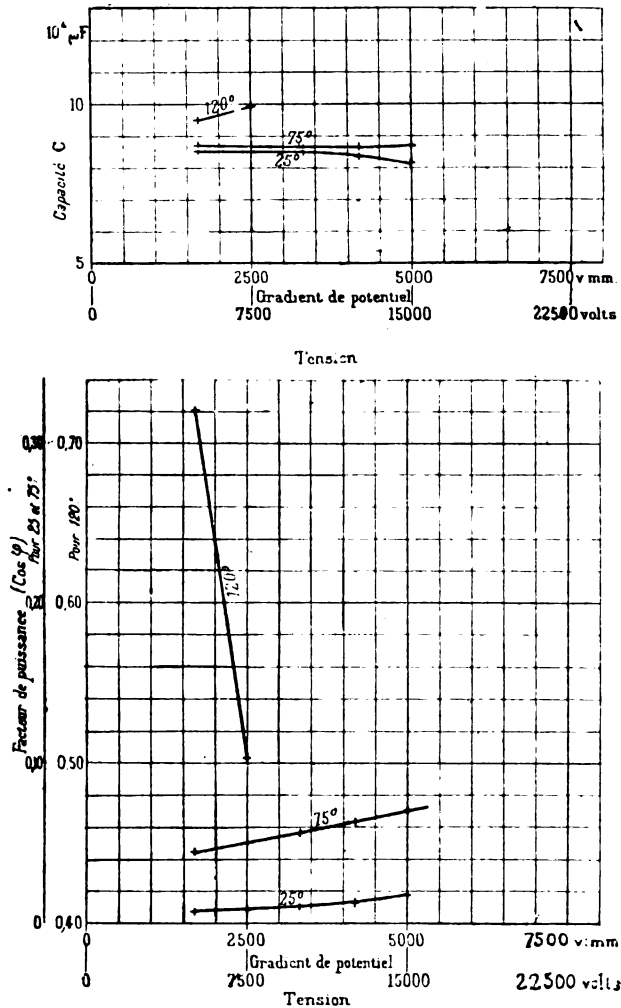


Figure 23. — Facteur de puissance et capacité de l'éprouvette N° 21 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

» Les pertes dans ces éprouvettes, si différentes en somme de celles dans la précédente, sont cependant représentées par des courbes qui ont presque exactement la même forme. On trouve, en effet, que, pour le N° 19, les pertes à 70° C augmentent proportionnellement à la puissance 2,6 de la tension, et pour le N° 21 elles augmentent suivant la puissance 2,4.

» Jusqu'à présent nous n'avons considéré que des épaisseurs constantes de diélectriques. On peut aussi faire varier le gradient

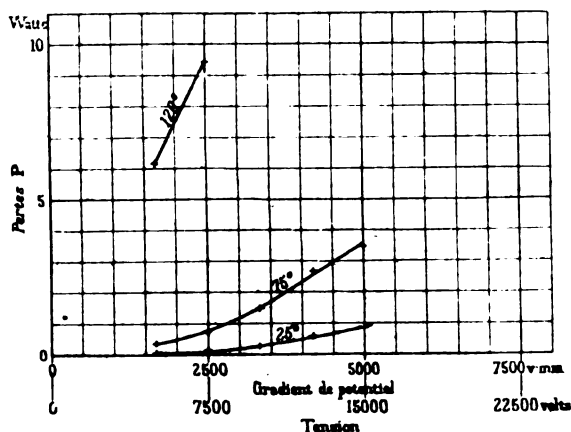


Figure 24. — Pertes de l'éprouvette N° 21 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes températures.

de potentiel en modifiant l'épaisseur. Nous avons fait un certain nombre d'essais sur des éprouvettes auxquelles nous enlevons suc-

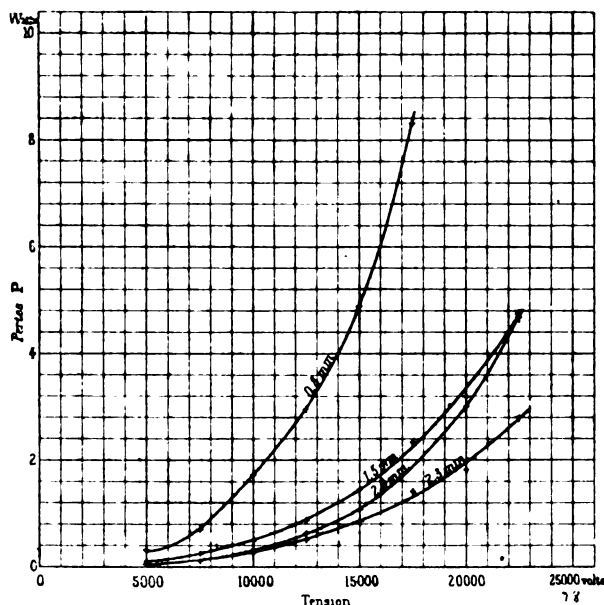


Figure 25. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de la tension, pour différentes épaisseurs.

cessivement des couches de papier. Nous retrouvons toujours les mêmes allures de courbes, en fonction du gradient de potentiel et de la tension.

» Ces dernières courbes, de même que toutes celles qui suivent, ont été relevées à une température constante prise entre 35°C

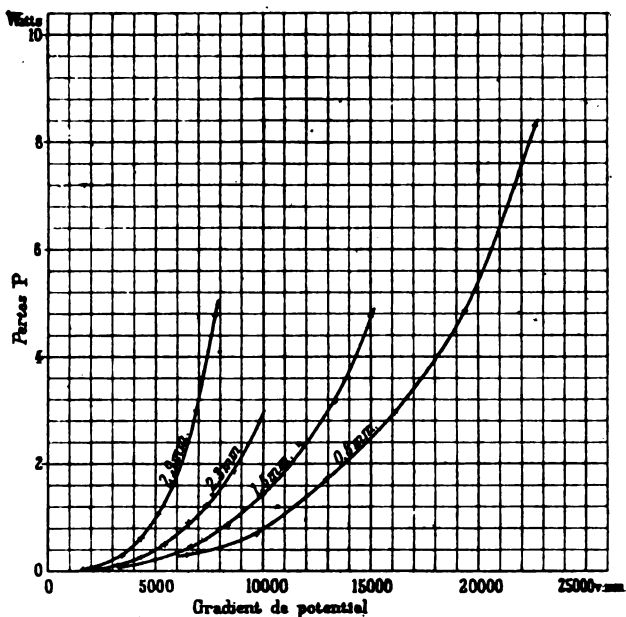


Figure 26. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes épaisseurs.

et 40°C, afin de diminuer l'erreur due à une légère variation de température qui pourrait se produire. Cette précaution est im-

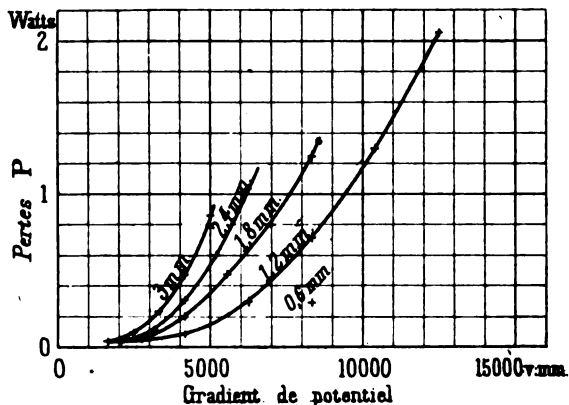


Figure 27. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction du gradient de potentiel, pour différentes épaisseurs.

portante, surtout dans le cas des essais en fonction de la fréquence, ceux-ci prenant beaucoup de temps.

» Les résultats obtenus pour l'éprouvette N° 10 sont indiqués

par les courbes des figures 25 et 26 ; ceux de l'éprouvette N° 20 sont montrés sur la figure 27.



» INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR. — Reprenons les valeurs de la courbe des pertes en fonction du gradient de potentiel pour l'éprouvette N° 10 (figure 26). Ces valeurs étudiées en fonction de l'épaisseur donnent les courbes de la figure 28. Nous voyons donc

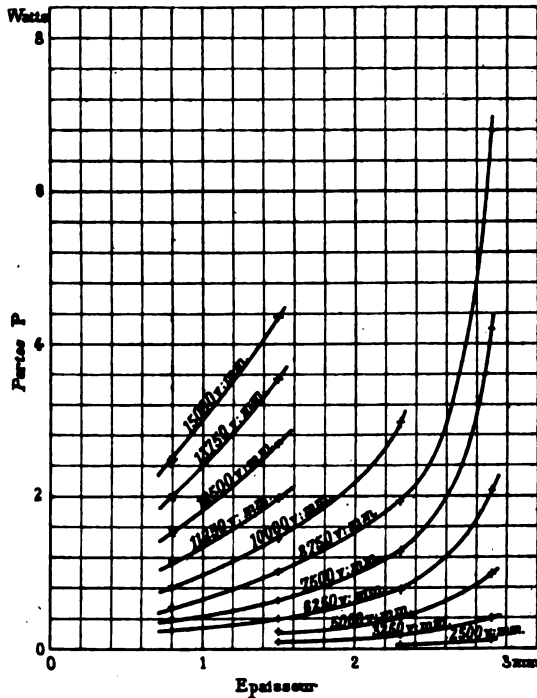


Figure 28. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différents gradients de potentiel.

que les pertes augmentent avec l'épaisseur pour un gradient de potentiel donné, sans toutefois être proportionnelles au volume, et que, à partir d'une certaine épaisseur, cette augmentation est considérable.

» Puisque, d'une part, pour une épaisseur donnée, les pertes augmentent avec le gradient de potentiel et que, d'autre part, pour un gradient fixe ces pertes diminuent avec l'épaisseur, nous pouvons supposer qu'il existe, pour une tension donnée, une épaisseur pour laquelle les pertes sont minimum. C'est ce que nous avons

constaté sur l'éprouvette N° 10 (fig. 29). Remarquons que les courbes aux différentes tensions ont leurs minima sur la verticale qui correspond à une épaisseur d'environ 2,2 mm. En d'autres termes, pour un diélectrique donné, il existe une épaisseur pour laquelle les pertes sont minima pour toutes les tensions. Ceci peut avoir une conséquence pratique importante.

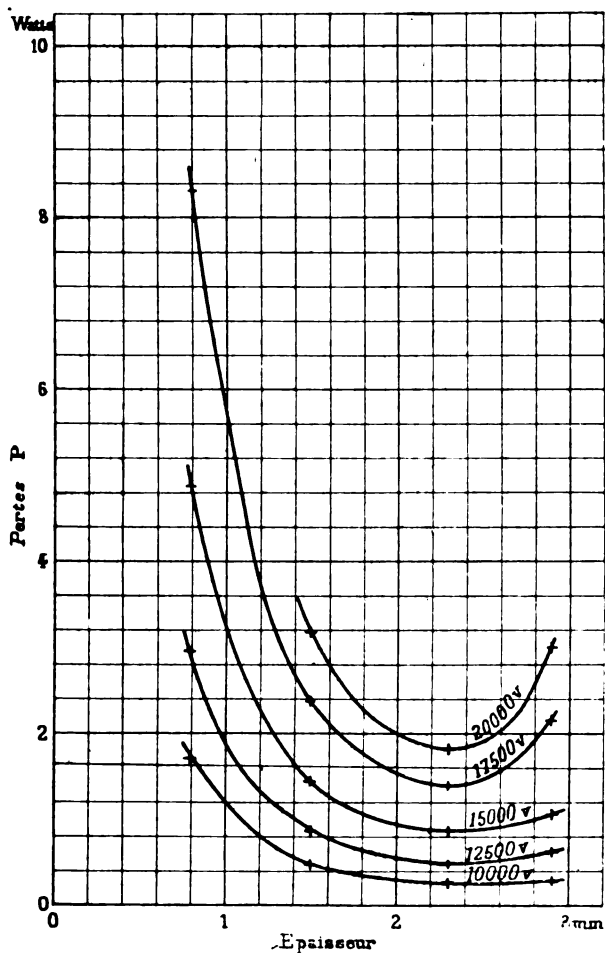


Figure 29. — Pertes de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

» Le facteur de puissance suit les variations des pertes (fig. 30). La capacité ne présentant rien d'anormal, nous nous sommes abstenu d'en donner les courbes.

» Les pertes dans les échantillons des séries C et D étant plus faibles, le point optimum que nous venons de constater n'ap-

paraît pas dans la limite de nos mesures sur l'échantillon N° 20 (fig. 31 et 32).

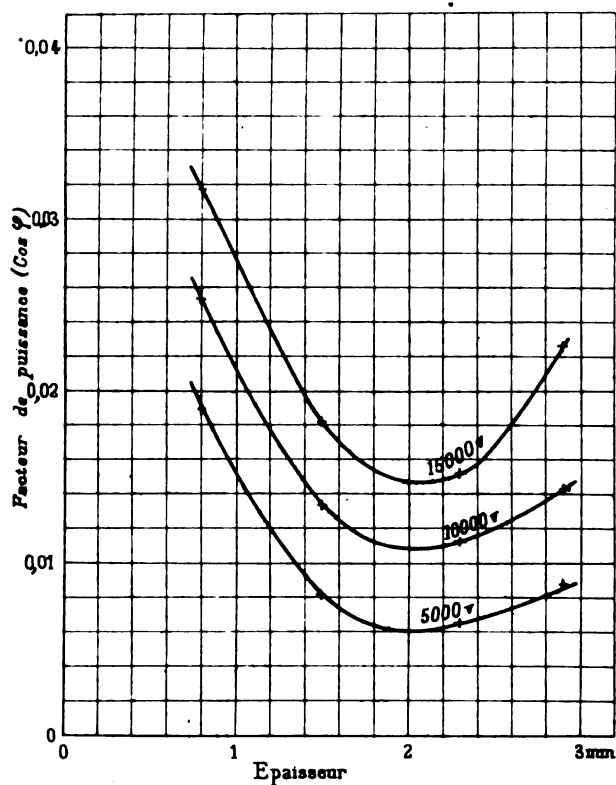


Figure 30. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 10 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

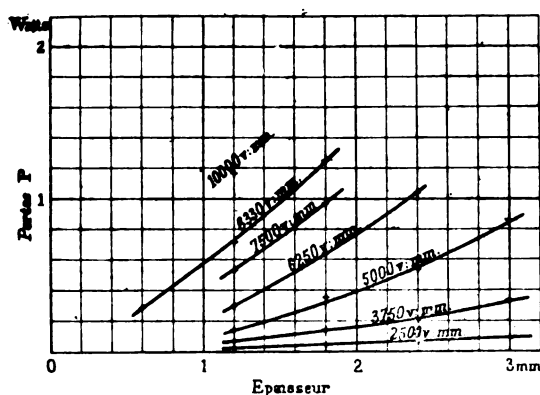


Figure 31. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction de l'épaisseur, pour différents gradients de potentiel.

» INFLUENCE DU RAYON DE COURBURE. — On sait que le gradient de potentiel n'est pas uniforme dans la masse d'un condensateur cylindrique, mais qu'il est plus élevé au centre qu'à la périphérie et qu'il se distribue différemment suivant l'importance du rayon

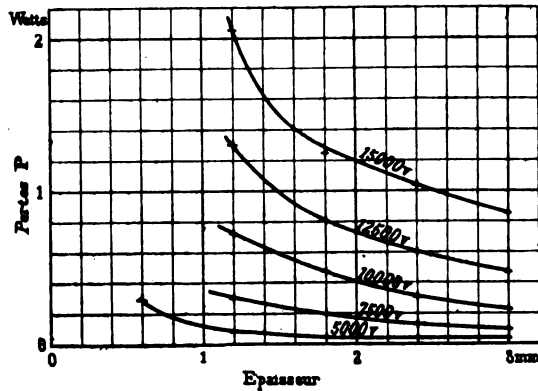


Figure 32. — Pertes de l'éprouvette N° 20 en fonction de l'épaisseur, pour différentes tensions.

de courbure (62). Cette distribution étant représentée par la formule :

$$\frac{dU}{d\rho} = \frac{U}{\rho \log_e \frac{r}{R}},$$

dans laquelle $\frac{dU}{d\rho}$ représente le gradient de potentiel à l'extrémité du rayon ρ ; r , le rayon de la surface interne et R , le rayon de la surface externe du cylindre.

» Le gradient de potentiel augmente lorsque ρ diminue et, pour une épaisseur donnée, il tend vers une valeur constante lorsque r augmente.

» Nous avons voulu vérifier l'influence que cette particularité pouvait avoir sur des éprouvettes de différents rayons. Les résultats sont donnés par les courbes de la figure 33. Ils se rapportent à la moyenne d'au moins deux éprouvettes pour chaque diamètre. Toutes avaient 3 mm d'épaisseur. Les pertes sont exprimées en watts par décimètre carré de surface moyenne du diélectrique.

» On remarquera que les pertes diminuent d'abord avec le diamètre et qu'elles augmentent ensuite. Il se produit un minimum pour un diamètre d'environ 15 mm. Nous avons indiqué en

pointillé la courbe pour les éprouvettes de 40 mm, car cette courbe comporte une erreur due aux effluves, plus grande que pour les autres diamètres. Evidemment, cela n'explique qu'en partie la forte augmentation des pertes à partir de 20 mm.

» La marche générale du phénomène pourrait peut-être s'expliquer de la manière suivante. Pour les petits diamètres, la chaleur produite est localisée, en grande partie, près de la surface interne et une augmentation du diamètre facilite le rayonnement tout en diminuant l'importance du gradient de potentiel en ce point. A partir d'un certain moment, le gradient de poten-

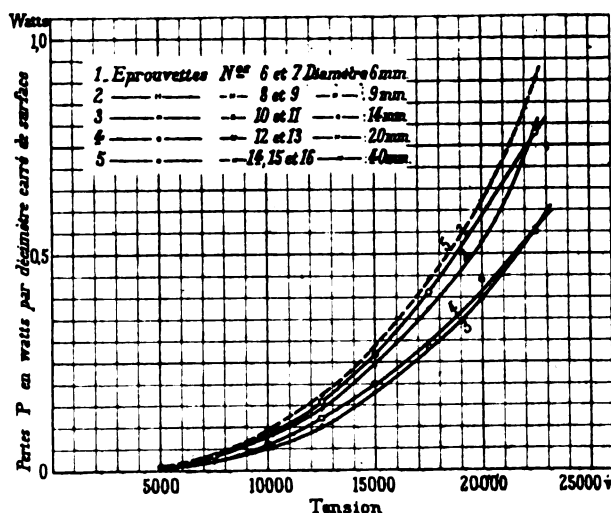


Figure 33. — Pertes, en fonction de la tension, d'éprouvettes de différents diamètres.

tiel se distribuant plus uniformément, la chaleur produite au centre de la masse devient relativement plus importante, la chaleur se dégage moins facilement, d'où augmentation de la température et des pertes. Evidemment, les choses se passeraient différemment, si le centre de l'éprouvette était constitué par un corps dont la température serait plus élevée : un conducteur traversé par un courant, par exemple. Il y aurait peut-être lieu aussi d'attribuer une partie du phénomène au fait que les éprouvettes de 6, 9 et 14 mm de diamètre étaient enroulées sur un cylindre en bois, tandis que celles de 20 et 40 mm étaient sur tubes en carton. Ceci ne doit cependant donner qu'une faible importance et ne pas modifier l'allure générale du phénomène.

» INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE. — Nous avons étudié, sur quelques éprouvettes, l'effet d'une variation de la fréquence, entre 20 et 60 périodes par seconde. Les courbes des figures 34 et 35 indiquent les résultats obtenus sur l'éprouvette N° 5.

» A la tension de 15 000 volts, les pertes sont rigoureusement proportionnelles à la fréquence ; elles augmentent un peu moins

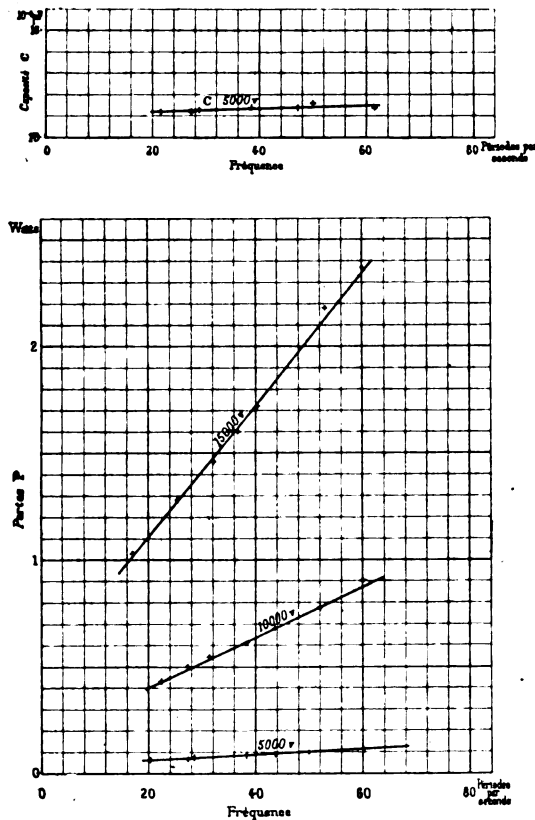


Figure 34. — Pertes et capacité de l'éprouvette N° 5 en fonction de la fréquence, pour différentes tensions.

pour les tensions de 5 000 volts et de 10 000 volts ; à 15 000 volts, la capacité est constante pour toutes les fréquences ; à 5 000 et 10 000 volts, elle augmente légèrement. Le facteur de puissance suit naturellement une courbe qui résulte de ces deux actions.

» Dans l'ensemble, nous pouvons dire que nos essais nous ont montré que, pour des fréquences de 20 à 60 périodes par seconde,

les pertes augmentent légèrement moins qu'en proportion directe de la fréquence.

» Notons enfin que, si les pertes dans les diélectriques doivent être attribuées en grande partie à une viscosité, elles devraient augmenter avec la fréquence ; mais nos essais ont été effectués

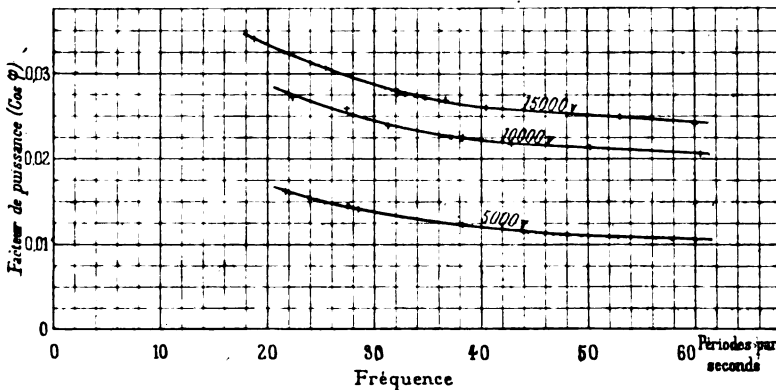


Figure 35. — Facteur de puissance de l'éprouvette N° 5 en fonction de la fréquence, pour différentes tensions.

entre des limites de fréquence trop restreintes pour que nous puissions nous prononcer.



» CONCLUSION. — Les conclusions à tirer de nos recherches sur un diélectrique composé de papier imprégné d'un mélange comprenant surtout de la résine et de la vaseline, peuvent être résumées comme suit :

» 1°) L'électrodynamomètre à miroir, d'une sensibilité de l'ordre de 10^{-8} R watts par millimètre (R, résistance du circuit en dérivation), se prête très bien à la mesure directe des pertes d'énergie dans les diélectriques, par l'utilisation d'une simple résistance dans le circuit en dérivation. Cette méthode exige cependant que toutes les précautions indiquées dans cette étude soient prises et que le bon fonctionnement du montage soit vérifié, expérimentalement, avec grand soin.

» 2°) Les pertes par effluves n'ont pas d'importance appréciable, même à 25 000 v, à condition d'utiliser une éprouvette de forme cylindrique allongée.

» 3°) Les pertes ne sont pas rigoureusement constantes par

rapport au temps. Il n'est pas rare de trouver des différences de plus de 10 pour 100 pour des mesures identiques effectuées à différents moments.

» 4°) Les pertes par effet Joule sont négligeables devant les pertes par hystérésis, à toutes les températures et pour toutes les tensions comprises respectivement entre 0° C à 125° C et 5 000 v à 25 000 v.

» 5°) En fonction de la température, les pertes peuvent s'exprimer par une formule de la forme :

$$P = m T^n$$

dans certaines limites de température et pour un gradient de potentiel assez élevé. Dans le cas du diélectrique utilisé d'habitude pour les câbles électriques de basse tension (5 000 à 10 000 v), cette expression devient :

» De 0° C à 25° C : $P = a T^{-0,3}$

» De 70° C à 125° C : $P = b T^{3,6}$

» 6°) En fonction de la tension, on peut utiliser la formule :

$$P = m U^n$$

Dans le même cas que précédemment, on obtient, pour des gradients de potentiel supérieurs à 3 500 v:mm et à la température de 56° C :

$$P = c U^{2,5}$$

L'exposant varie de 2,7 à 1,9 lorsque la température passe de 15° C à 120° C.

» 7°) Pour fixer les idées, on peut dire que les pertes à 40° C et pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm sont (toujours pour le même cas particulier) d'environ 0,2 watt par mètre de longueur, pour une éprouvette de 20 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur.

» 8°) La capacité est peu modifiée par les variations de la température et par celles de la tension.

» 9°) Le facteur de puissance, pour un gradient de potentiel de 2 500 v:mm, varie de 0,015 à 0,25 pour un écart de température de 35° à 110° C.

» 10°) Lorsque l'épaisseur du diélectrique diminue, les pertes augmentent si la tension reste constante ; elles diminuent si le

gradient de potentiel reste constant. Il existe donc une épaisseur optimum pour laquelle les pertes sont minima pour toutes les tensions.

» 11°) Lorsque le rayon de courbure de l'éprouvette augmente, les pertes diminuent tout d'abord, puis elles augmentent pour atteindre un maximum lorsque le rayon devient suffisamment grand, probablement.

» 12°) Les pertes augmentent presque proportionnellement à la fréquence. »



En terminant, nous voulons remercier M. le professeur Paul Janet, pour ses sages conseils, et MM. les chefs de Travaux du Laboratoire central d'Electricité qui, mis au courant du peu de temps dont nous disposions pour faire notre étude, ont fait tout ce qui était en leur pouvoir pour nous faciliter notre travail. Nous tenons à remercier tout particulièrement M. Paul de la Gorce pour l'intérêt qu'il n'a cessé de porter à nos recherches et pour l'aide efficace qu'il nous a prêtée en maintes occasions.

Enfin, Messieurs les Membres du Bureau de la Société française des Electriciens voudront bien trouver ici l'expression de notre vive reconnaissance pour la confiance qu'ils nous ont témoignée en nous attribuant la bourse Hughes pour l'année 1921-1922. Sans leur appui, il nous aurait été bien difficile d'entreprendre nos recherches.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) 1861 SIEMENS, W. (VON). De l'échauffement du verre des bouteilles de Leyde. *Monatsberitch Berliner Akad*, oct. 1861; *Kon. Preuss. Akademie zu Berlin*, Berichte, 1864.
- 2) 1873 MAXWELL. « Electricité et magnétisme ». Théorie des résidus.
- 3) 1878 AYRTON et PERRY. On the viscosity of dielectrics. *Proceedings of the Royal Society*, 1878, vol. 27, p. 238.
- 4) 1882 NACCARI et BELLATI. *Atti di Torino*, 1882, t. VII ; *Journal de Physique*, 1882, 2^e série, t. I. Trouvent que l'échauffement du diélectrique est proportionnel au carré de l'intensité du champ.
- 5) 1891 CRADEW, P. Energy loss in condensers. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1891, vol. 20, p. 447.
- 6) 1892 STEINMETZ, C.-P. Dielectric hysteresis. *Electrical Engineer*, 1892, p. 272 ; *Lumière Electrique*, avril 1892, t. XLIV. — A la suite d'expériences sur un condensateur en papier paraffiné, signale l'analogie du phénomène avec celui d'hystérésis magnétique. Trouve que les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité du champ.
- 7) 1892 ARNO, R. Rotating field and electric hysteresis. *Electrician*, 1892-93, p. 516; 1893, p. 201; 1893-94, p. 22 ; *Atti delle R. Accademia del Lincei*, 1892, vol. 1, p. 284. — Expérimente au moyen d'un cylindre diélectrique suspendu dans un champ tournant. Trouve que les pertes sont proportionnelles à la puissance 1,6 du champ.
- 8) 1893 JANET, P. Hystérésis et viscosité diélectrique du mica pour des oscillations rapides. *Journal de Physique*, 1893, 3^e série, t. II ; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1893, t. CXVI, p. 373. — Etablit expérimentalement la courbe d'hystérésis diélectrique.
- 9) 1893 BOREL, C. Phénomènes dynamiques à l'électrisation résiduelle des diélectriques. *Arch. Genève*, 1893, t. XXX ; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1893, t. CXVI, p. 1192. — Expérimente sur disque en papier paraffiné suspendu dans un champ périodique, en présence d'un diélectrique à résidu. Attribue pertes à un phénomène de conduction interne ou externe. Les bons conducteurs comme les bons diélectriques sont sans effets.
- 10) 1893 FRITZ, H. Über warmetonung bei electrischer polarisations des glasses. *Thèse, Zurich*, 1893. Mesure au calorimètre. — Constate que l'échauffement est proportionnel au carré de l'intensité du champ électrique.
- 11) 1893 BEDELL, BALLYNTINE et WILLIAMSON. Alternate current and dielectric hysteresis. *Phys. Review*, sept.-oct. 1893, vol. 1, N° 2. — Etudient condensateur en papier enduit de cire. Etablissent des cycles des charges en fonction de la différence de potentiel.
- 12) 1895 PORTER et MORRIS. Dissipation of energy in dielectrics. *Proceedings of the Royal Soc.*, 1893, vol. 54, p. 7 ; 1895, vol. 57, p. 469 ; *Journal de Physique*, 1896, 3^e série, t. V. — Etudient au balistique un conden-

sateur en papier paraffiné. Trouvent qu'il n'y a pas d'hystérésis de champ électrique.

- 13) 1895 GASNIER, P. Energy losses in dielectrics. *Electrician*, 1895, vol. 36, p. 7.
- 14) 1895 EISLER, H. Hystérésis diélectrique. *Eclairage électrique*, août 1895, t. IV. — Montre que les pertes sont proportionnelles au carré de la différence de potentiel et qu'elles tendent vers 0 pour une périodicité nulle ou infinie.
- 15) 1895 HESS, A. *Journal de Physique*, 1895, 3^e série, t. II ; *Eclairage électrique*, 1895, t. III. — Emet théorie déduite de la théorie des résidus de Maxwell.
- 16) 1895 PELLAT, H. Mesure de la force agissant sur un diélectrique non électrisé, placé dans un champ électrique; *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1895, vol. 121, p. 938. — Expérimente sur lame diélectrique suspendue entre deux armatures, par une méthode de pesée. Vérifie la loi de la proportionnalité au carré de la tension.
- 17) 1895 DUGGELIN. *Vierteljahrschrift*, Zurich, 1895, t. XXXIX. — Etudie un grand nombre de diélectriques par l'intermédiaire de leur élévation de température. Trouve un rapport simple entre l'échauffement et la différence de potentiel.
- 18) 1896 GOUY, A. Sur le rôle des milieux diélectriques en électrostatique. *Journal de Physique*, 1896, 3^e série, t. VI, p. 154. — Etude théorique.
- 19) 1897 HOULLEVIGUE, L. Sur le résidu des condensateurs. *Ann. Université de Lyon*, 1897, t. XXXII ; *Journal de Physique*, 1897, 3^e série, t. VI, p. 113. — Théorie sur les charges résiduelles. Décompose le déplacement électrique de Maxwell en deux phases: un déplacement instantané de l'éther, suivi d'un déplacement graduel moléculaire sous la tension exercée par le premier.
- 20) 1897 SCHAUFELBERGER. Ueber histeresis in dielectrischen. Zurich 1897. *Journal de Physique*, 1898, 3^e série, t. VII. — Vérifie la loi de la proportionnalité des pertes au carré de la tension, au moyen d'échantillons oscillant entre des armatures.
- 21) 1898 QUINCKE, G. Viscosity in an electric field. *Annalen der Physik und Chemie*, 1897, vol. 62 ; *Science abstracts*, 1898, vol. 1, N° 106.
- 22) 1898 HANAUER, J. Influence of frequency on capacity. *Science abstracts*, 1898, vol. 1, N° 1350 ; *Ann. der Physik und Chemie*, 1898, vol. 65, p. 789. — Mesures par méthode de pont.
- 23) 1899 PELLAT, H. Polarisation réelle des diélectriques, conséquences de cette polarisation. *Annales de Chimie*, 1899, vol. II, p. 150 et 571.
- 24) 1899 ROSA et SMITH. Condensers losses. *Physical Review*, 1899, vol. 8, p. 1. — Etudient le rendement d'un condensateur au calorimètre.
- 25) 1900 BEAULARD, F. *Ann. Université de Grenoble*, 1900, t. XIII ; *Journal de Physique*, 1900, 3^e série, t. IX. — Etudie un condensateur en diélectrique. Constate que pour une période très longue les pertes d'énergie sont nulles.

- 26) 1900 PELLAT et BEAULARD. De l'énergie absorbée par un condensateur soumis à une différence de potentiel périodique; *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1900, vol. 130, p. 1457. — Théorie sur condensateurs à un seul diélectrique sur lequel agit une force électrique périodique.
- 27) 1900 POTTS, L.-M. Measurement of electric absorption and hysteresis. *American Journal of Science*, août 1900, t. X, p. 91-114. — Mesure faite avec un électrodynamomètre sur montage en pont.
- 28) 1901 MORDEY, W.-H. Capacity in alternating-current working. *The Electrician*, 18 janvier 1901. — Discussion générale sur le fonctionnement du diélectrique des câbles employés en courant alternatif. Résultats de mesures des pertes d'énergie dans les diélectriques de câbles.
- 29) 1901 STEINMETZ, C.-P. Some notes on dielectric losses. *Electrical World*, juin 1901, p. 1065. — Etude condensateur en papier paraffiné. Trouve que la capacité a une valeur constante, que les pertes sont proportionnelles au carré de la tension, que les pertes par cycle sont proportionnelles au carré du champ électrique. Est d'opinion que l'hystérésis diélectrique existe, mais que les pertes sont en partie dues aux mouvements de globules d'air dans la masse du corps.
- 30) 1902 SKINNER, C.-E. Energy losses in commercial insulating materials when subjected to high potential stresses. *Amer. Institute of Electrical Eng.*, 1902, N° 1, p. 1047. — Etude différentes matières au moyen du calorimètre et du wattmètre en fonction de la fréquence, de la température et de la tension.
- 31) 1902 MERCANTON, P.-L. Contribution à l'Etude des pertes d'énergie dans les diélectriques. Edité par Corbaz et Cie, Lausanne, 1902. — Etude historique. Etablit cycles d'hystérésis, par méthode du point, de paraffine mélangée avec différents corps conducteurs et isolants. N'a pas pu trouver de formule simple pour exprimer les pertes en fonction du potentiel.
- 32) 1902 SCHWEIDLER, E. Conductivity and polarisation in dielectrics. *Science Abstracts*, 1903, vol. 6, N° 919 ; *Sitzungsberichte der Kais. akad. Wien*, 1902, vol. III, p. 579.
- 33) 1905 CORBINO, O.-M. Viscosité diélectrique des condensateurs. *Eclairage électrique*, mai 1905, p. 227-230; *Nuovo Cimento*, 1905, vol. 9, p. 81. — Etude papier paraffiné. Utilise arc chantant comme source d'énergie. Relève courbe au tube de Braun. Trouve 3° d'angle de phase à 1 900 périodes par seconde et 2° 10' à 3 640 périodes par seconde.
- 34) 1907 LAMPA, A. Dielectric hysteresis. *Science Abstracts*, 1907, vol. 10 A, N° 1055 ; *Sitzungsberichte der Kais. akad. Wien*, 1906, vol. 115, p. 1659. — Prétend que, si l'hystérésis diélectrique existe, elle doit être de nature visqueuse et indépendante de l'histoire du corps.
- 35) 1907 SAGNAC, G. Sur la théorie et la formule de Clausius. *Journal de Physique*, 1907, 4° série, t. VI, p. 273.
- 36) 1907 MACLES, L. Recherche expérimentale sur les diélectriques solides. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*,

- 1907, vol. 144, p. 264. — Trouve que la paraffine se conduit comme un diélectrique parfait. Pour les diélectriques solides (verre, mica, ébonite), mis à l'abri des effets de pénétration, et de conductibilité, il observe surcharge et résidu.
- 37) 1907 MONACH, B. Des pertes dans les diélectriques. *Journal de Physique*, 1907, 4^e série, t. VII; *An. der Phys.*, 1907, vol. 22, p. 905. Mesures au pont, téléphone optique. — Trouve que les pertes sont exactement proportionnelles au carré de la tension. Dans les câbles, les pertes sont proportionnelles à la fréquence.
- 38) 1907 SCHWEIDLER, E. Dielectric anomalies. *Sciences abstracts*, 1908, vol. 11 A, N° 650 ; *An. der Physik*, 1907, vol. 24, p. 711. — Théorie déduite de celle de Pellat.
- 39) 1907 GROVER, F.-W. Simultaneous measurement of capacity and power factor of condensers. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1907, vol. 3, p. 371. — Description et discussion de divers montages en pont.
- 40) 1909 MACLES, L. Recherches sur les résidus diélectriques. *Journal de Physique*, 1909, 4^e série, t. VIII, p. 631. — Poursuit l'étude signalée plus haut. (1907).
- 41) 1909 EMANUELLI, L. Pertes dans les diélectriques. *Sciences abstracts*, 1909, vol. 12 B, N° 639 ; *Atti Dell'Asso. Elettrotecnica Italiana*, 1909, vol. 13, p. 23. — Trouve que les pertes sont proportionnelles au carré de la tension pour des gradients de potentiel compris entre 10 et 500 v/mm, elles sont proportionnelles à la capacité à condition que le diélectrique soit homogène. La surface du cycle d'hystérésis diminue lorsque la fréquence augmente. Dans certains cas, elles restent constantes ou même elles augmentent.
- 42) 1909 MADELUNG. Rigidité diélectrique dans les gaz très raréfiés. *Journal de Physique*, 1909, 4^e série, t. VIII, p. 507. — Recherches au moyen du tube de Braun.
- 43) 1910 BEAULARD et MAURY. Absorption de l'énergie électrique par un milieu diélectrique. *Journal de Physique*, 1910, 4^e série, t. IX, p. 39.
- 44) 1910 CURTIS. Mica condensers as standards of capacity. *Bull. of Bureau of Standards*, 1910, vol. 6, N° 4, p. 431. Etude très étendue sur les condensateurs au mica. L'auteur prétend que l'absorption due à la non homogénéité n'est qu'une faible partie de l'absorption totale.
- 45) 1910 HOCHSTADTER. Dielectric losses in high tension cables. *Science abstracts*, 1910, N° 558, p. 243 ; Die Dielektrischen eigenschaften moderner Hochspannung kabel mit Rucksicht auf die Verwendung von Kabeln für Spannungen über 20 000 v. ; *E. T. Z.*, 1910, p. 467. — Etude très importante sur les câbles électriques. L'auteur établit la courbe d'hystérésis par l'intermédiaire de relevés oscillographiques. Il trouve que les pertes sont exactement proportionnelles à la fréquence, et qu'elles augmentent un peu plus que proportionnellement au carré de la tension. Il trouve un minimum de pertes à une température de 40° et pas de trace de viscosité ou de polarisation dans les câbles isolés au papier.

- 46) 1911 GROVER, F.-W. Measurements on paper condensers. *Bull. of the Bureau of Standards*, 1911, p. 495. — Etude les condensateurs isolés au papier, de plusieurs fabricants, américains et européens. Trouve que la capacité et l'angle de phase ne varient pas suivant une loi simple en fonction de la température et de la fréquence. Il trouve des angles de phase qui varient de 6' à 22°. Intéressante discussion et comparaison entre les théories de Maxwell, Pellat, Schweidler, etc. Conclut que seule la théorie de Schweidler s'accorde quantitativement avec les résultats trouvés.
- 47) 1912 DÉCOMBE, L. Théorie électronique des phénomènes diélectriques résiduels. *Journal de Physique*, 1912, 5^e série, t.II, p. 181. — Etude théorique. Est conduit à attribuer la « chaleur de Siemens » à une viscosité propre de l'atome.
- 48) 1912 RAYNER, E.-H. High voltage tests and energy losses in insulating materials. *Journal of the Inst. of Elect. Eng.*, 1912, p. 3. — Dans une première partie, l'auteur étudie la rigidité. Dans la deuxième partie, il donne le résultat de mesures faites au moyen du wattmètre électrostatique, sur certains isolants industriels. Il donne une bibliographie très complète de 18 pages.
- 49) 1912 FLEMING et DYKE. On the power factor and conductivity of dielectrics when tested with alternating currents of telephonic frequency at various temperature. *Journal of the Inst. Elect. Eng.*, 1912, p. 323. — Essais de plusieurs matières isolantes. Pertes mesurées par une méthode de pont. Nombreuses courbes et tableaux. Discussion de la méthode de mesure et des résultats.
- 50) 1916 GRUNBERG, M. *Verluste im Dielektrikum technischer Kondensatoren*. Edité par J. Springer, Berlin, 1916. — L'auteur utilise l'électromètre pour étudier le mica, le verre et le papier. Il trouve que les pertes augmentent un peu plus vite que le carré de la tension, qu'elles sont proportionnelles à la fréquence et qu'elles augmentent rapidement avec la température. Les pertes dans le verre sont plus grandes et moins stables que celles dans le mica.
- 51) 1917 SKINNER, C.-E. Dielectric losses in insulating materials. *Journal of the Franklin Institute*, 1917, vol. 183, p. 667. L'auteur utilise un wattmètre électrostatique à quadrants de construction spéciale. Il mesure les pertes dans les matières diverses et dans certains appareils industriels : transformateurs, bornes pour haute tension, etc. Il constate que les pertes en fonction de la tension peuvent s'exprimer par une exponentielle. Des mesures faites sur des échantillons différents d'un même corps peuvent différer entre elles plus fortement que celles qui sont faites sur des corps différents.
- 52) 1917 CLARK et SHANKLIN. Insulation characteristics of high tension cables. *Trans. American Inst. of Elect. Eng.*, 1917, vol. XXXVI, p. 447. — Mesure à l'électrodynamomètre avec circuit compensé. Essai matière d'imprégnation et câbles. Nombreuses courbes.

- 53) 1917 BANG et LOUIS. The influence of dielectric losses on the rating of high tension underground cables. *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, 1917, vol. XXXVI, p. 431. — Mesures industrielles sur câbles électriques installés dans une conduite, dans le but de déterminer les conditions maxima admissibles pour le fonctionnement.
- 54) 1918 FARMER. Dielectric power losses. *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, 1918, vol. XXXVII, p. 222. — Mesures faites par méthode des trois wattmètres sur câble triphasé de 3 m de longueur. — L'auteur trouve que les pertes varient suivant une exponentielle en fonction de la température et de la tension.
- 55) 1918 SOLERI, E. Le intensita di corrente ammissibili nei cavi ad alta tensioni. *L'Elettrotecnica*, fév. 1918, vol. 5, p. 54 et 75. — Analyse des travaux d'autres expérimentateurs. L'auteur mesure les pertes sur un câble de 20 m de longueur : pertes dans le cuivre, dans l'isolant. Calcul de l'intensité du courant maximum admissible.
- 56) 1919 BOUZON. Etude des diélectriques industriels. *Revue générale de l'Electricité*, 1919, t. VI, p. 137 et 181. — L'auteur étudie la rigidité diélectrique, résistance d'isolement, capacité inductive spécifique et pertes d'énergie. Discussion générale.
- 57) 1920 RENNESSON, G. Sur les pertes d'énergie dans les diélectriques des câbles industriels. *Revue générale de l'Electricité*, 1920, t. VII, p. 579. — Mesures faites au moyen d'électrodynamomètre de construction spéciale. L'auteur étudie les pertes en fonction de la température et de la tension. Il remarque l'inconstance du phénomène et trouve un minimum de pertes pour 30°.
- 58) 1921 GRANIER, J. Sur le tracé des cycles de viscosité diélectrique. *Revue générale de l'Electricité*, 1921, t. X, p. 219. L'auteur établit des courbes d'hystérésis par la méthode du point avec galvanomètre balistique ; il étudie le mica, la paraffine et le pétrole. Il trouve que sous une tension sinusoïdale, les cycles sont elliptiques et que certains condensateurs ne présentent aucune viscosité.
- 59) ARMAGNAT, H. *Wattmètres*. Encyclopédie Electrotechnique. Edité par L. Geisler, Paris.
- 60) LAWS, F.-A. *Electrical Measurements*. Edité par Mc Graw-Hill, New-York.
- 61) DE LA GORCE. Détermination des harmoniques. *Bull. Soc. franç. des Electriciens*, 1914, p. 545.
- 62) JANET, P. *Leçons d'électrotechnique générale*, vol. I. Edité par Gauthier-Villars, Paris.
- 63) BOUASSE, H. *Cours de Magnétisme et d'Electricité*, 3^e partie. (Etude du champ électrique.) Edité par Delagrave, Paris.

**SUR LES CONDITIONS IMPOSÉES POUR LA FOURNITURE
DES LAMPES A INCANDESCENCE
QUANT A LEURS CARACTÉRISTIQUES LUMINEUSES ET ÉLECTRIQUES**

M. J. PIONNIER. — « On ne peut manquer d'être frappé, en prenant connaissance des clauses des cahiers des charges relatifs aux fournitures de lampes à incandescence aux grandes administrations, de la complication des essais de réception de ces lampes. La détermination des caractéristiques, qui porte, à la fois, sur la tension du courant à appliquer aux bornes, sur l'intensité lumineuse obtenue, sur la consommation d'énergie électrique totale et la consommation spécifique, et, enfin, sur la durée de la lampe, comporte nécessairement une certaine tolérance pour chacune de ces mesures. Or, en raison, d'une part, de ce que la résistivité du filament varie avec la température et, d'autre part, de ce que l'intensité lumineuse n'est pas, pour une même lampe, simplement proportionnelle à la tension ni à la consommation d'énergie, il en résulte que les prescriptions des cahiers des charges aboutissent très souvent à imposer des conditions qui, appliquées strictement, seraient contradictoires, ou à admettre, en fin de compte, des lampes qui travailleront à des régimes spécifiques très sensiblement différents, auxquels correspondront, pour elles, des durées aussi très différentes.

» Ces observations étaient, il est vrai, encore plus justifiées pour les lampes à filament de carbone pour lesquelles, la résistivité du filament décroissant très rapidement avec la température, une surtension, même légère, avait pour effet de « pousser » très vite la lampe. Le tableau suivant permet de voir de combien peu il suffisait d'augmenter la tension pour accroître sensiblement l'intensité lumineuse, et réduire considérablement la consommation spécifique en même temps que la durée :

Tension en volts	Intensité lumineuse en bougies décimales	Consommation spécifique (watts : bougie)	Durée utile (heures)
106,5	environ 12	4	environ 1 750
110	— 16	3,5	— 1 000
114	— 21	3	— 470
117,5	— 27	2,5	— 180

» Ce tableau fait nettement ressortir, en somme, que les deux

qualités « grand rendement lumineux sous faible consommation spécifique » et « durée » étaient incompatibles. Toutefois, le filament de carbone, tout en n'étant constitué que par un seul et même élément chimique, n'était pas physiquement homogène. Son traitement, qui permettait de transformer partiellement du carbone amorphe en carbone plus ou moins graphitique, ou d'en graphiter la surface, en modifiant en même temps la résistivité du filament et son pouvoir d'émission, donnait la possibilité d'améliorer, dans une certaine mesure, le rendement lumineux sans trop sacrifier la durée.

» Il n'en était pas moins fort utile de déterminer exactement la tension à appliquer aux bornes de la lampe pour obtenir une intensité lumineuse déterminée avec une consommation d'énergie également déterminée et pour assurer une durée normale.

» De nombreuses années furent cependant nécessaires pour obtenir que les mesures des caractéristiques fussent régulièrement effectuées et inscrites sur les lampes.

» Mais, pour l'une de ces mesures — puissance lumineuse émise — l'unité en fut longtemps imprécise, et si, en France, la bougie décimale est l'étalon pratique définitivement adopté, il n'en est pas moins vrai qu'aujourd'hui encore sont usitées, dans le monde, des unités dont la valeur est sensiblement différente.

» Or, cette imprécision de la valeur de l'unité d'intensité lumineuse a donné lieu, parfois, à de telles contestations que l'on a pu aller jusqu'à dire qu'il y avait, de la part des fabricants, tromperie sur la qualité de la marchandise vendue lorsque les lampes ne donnaient pas le nombre de bougies annoncé.

» Pour les lampes à filament de carbone, la mesure de l'intensité lumineuse émise se faisait assez facilement au photomètre. La disposition du filament était telle, en effet, dans ces lampes, qu'elle se prêtait à une mesure rapide sans que l'on eût à rechercher soigneusement une orientation rigoureuse du filament. Il suffisait d'éviter que des parties se trouvassent masquées par d'autres ; la mesure maximum ainsi obtenue pouvait être considérée comme peu différente de la valeur moyenne sphérique ou, du moins, le coefficient reliant les deux valeurs était à peu près constant pour toutes les lampes.

» Il n'en est plus de même avec les lampes à filament de tungstène ; la disposition du filament varie considérablement d'une fabrication à l'autre, d'où résulte l'obligation de relever, à peu

près, la valeur sphérique de l'intensité lumineuse, opération certainement plus complexe.

» D'autre part, l'intensité lumineuse et le régime spécifique de la lampe à filament de tungstène sont loin de varier aussi rapidement avec les changements de la tension, que pour les lampes à filament de carbone.

» Pour les premières, en effet, contrairement à ce qui se passe pour les secondes, la résistivité du filament augmente avec sa température ; l'intensité du courant y croît donc moins vite que l'augmentation de la tension appliquée aux bornes. Il y a, en quelque sorte, et dans une certaine mesure, autorégulation.

» Aussi, tandis que la durée du filament de carbone se trouve très affectée d'un régime économique anormal, le filament de tungstène supporte sans grand inconvénient des surtensions même importantes. On sait qu'un filament de tungstène, fonctionnant au régime de 1 watt par bougie, a une durée de plus de 1 000 heures.

» Il faut aussi remarquer que le tungstène tréfilé est maintenant universellement utilisé pour la confection des filaments. Or, le tungstène est un corps simple que l'on obtient à un état de pureté presque parfait ; sa constitution est toujours identique, contrairement au carbone des anciens filaments ; sa surface présente toujours le même état. On peut donc dire aujourd'hui que toutes les lampes, de quelque fabrication qu'elles soient, présentent des caractéristiques identiques lorsqu'elles sont construites avec des filaments de même longueur et de même diamètre et que le vide y est poussé au même degré. Elles ont le même rendement dans les mêmes conditions de fonctionnement et, à un régime spécifique déterminé, correspond un seul et même éclat intrinsèque.

» Ces différentes observations permettent de conclure :

» 1° Qu'il n'est pas nécessaire de procéder à la photométrie de la lampe à filament de tungstène avec autant de précision que pour la lampe à filament de carbone ;

» 2° Que le régime normal, actuellement admis par tous les fabricants pour la lampe à filament de tungstène dans le vide, étant d'environ 1 watt par bougie, c'est à ce régime que la photométrie devrait être faite.

» Etant donné ce qui précède, on peut se demander s'il ne serait pas possible de substituer aux conditions techniques exi-

gées pour la réception des lampes à filament métallique dans le vide, des essais qui auraient pour but, non pas de déterminer leur rayonnement lumineux en bougies, ou en lumens comme on l'a proposé, mais de les amener simplement à un éclat déterminé et de lire, à ce moment, la différence de potentiel aux bornes et le nombre de watts consommés. C'est ce nombre de watts qui serait substitué à l'indication de l'intensité lumineuse.

» Les fabricants eux-mêmes classeraient leurs lampes par la « tension » et le nombre de watts correspondant à l'éclat adopté, par exemple l'éclat d'une lampe consommant 1 watt par bougie décimale.

» Pour les lampes dites « demi-watt », ce serait un autre éclat à préciser également qui servirait au classement.

» Toute la question est de savoir s'il est actuellement possible de construire des appareils simples, pratiques, permettant de mesurer avec une précision suffisante l'éclat intrinsèque d'une source lumineuse, c'est-à-dire d'en situer exactement le spectre sur une échelle spectrale ou de la comparer avec l'éclat d'un foyer lumineux servant d'étalon. Un tel spectromètre, aussi simple et plus rapide qu'un photomètre, est-il réalisable?

» Cette suggestion a été soumise à l'Union des Syndicats de l'Electricité, qui l'a prise en considération et a exprimé le désir de voir établir par la Société française des Electriciens un programme d'essais à effectuer dans cette voie au Laboratoire central d'Electricité. L'Union des Syndicats s'est même offerte à prendre à sa charge, au moins en partie, les frais qui, d'ailleurs, ne peuvent être très élevés.

» Un commencement d'exécution a été donné à ce désir : le Laboratoire a, en effet, passé commande d'un spectrophotomètre, et l'étude en question sera entreprise dès que l'appareil aura été livré. »

BIBLIOGRAPHIE

La Technique de la Houille blanche, par Etienne Pacoret, Ingénieur civil. Préface de M. A. Blondel, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, membre de l'Académie des Sciences. Troisième édition, refondue et considérablement augmentée.

Tome III : Utilisation de l'énergie des chutes d'eau. Matériel de production et de transformation de l'énergie électrique. Transport de l'énergie électrique à haute tension. 1 vol. de 25 cm × 16 cm, de 1 005 pages, avec 675 figures.

Tome IV : Utilisation de l'énergie des forces hydrauliques. Application générale de l'énergie électrique. Usines centrales et usines locales. 1 volume de 25 cm × 16 cm, de 638 pages, avec 253 figures. Paris, Dunod, 1920.

Dans un précédent Bulletin ⁽¹⁾, il a été fait mention des deux premiers volumes de cette nouvelle édition, présentés par M. A. Blondel avec les plus élogieux commentaires. Il est juste de reconnaître que les tomes III et IV, récemment parus, et qui complètent l'ouvrage, ne sont pas moins méritoires.

Dans le tome III, l'auteur applique sa maîtrise coutumière à la description de tout ce qui concerne le matériel de production et de transformation de l'énergie électrique et de la transmission de l'énergie électrique à haute tension. C'est ainsi qu'il traite successivement — sans omettre ni les considérations théoriques essentielles, ni des exemples d'applications judicieusement choisis — les principales rubriques suivantes : Dynamos. Alternateurs. Moteurs à courant continu et à courant alternatif. Commutateurs. Convertisseurs. Transformateurs statiques. Etablissement et calcul des lignes et réseaux de transport de force à haute tension. Appareillage et matériel des lignes et des usines. Turbines à vapeur.

Dans le tome IV, l'auteur expose d'abord les conditions de fonctionnement et d'exploitation des usines centrales, ainsi que leur installation — quelques paragraphes étant réservés à la description des grands réseaux de France, avec cartes et nombreux renseignements numériques. Puis sont décrites les applications de l'énergie électrique à la traction, à l'électrochimie et à l'électrometallurgie. Enfin, un chapitre important traite de la législation et de la réglementation françaises des distributions d'énergie électriques, chapitre que terminent un coup d'œil sur les législations étrangères, ainsi que nombre de renseignements juridiques et administratifs, concernant les distributions d'énergie électrique.

Voici donc parachevé, en troisième édition, un ouvrage de la plus haute valeur technique et documentaire ; on ne saurait nier qu'avec ses 3 302 pages et ses 1 938 figures, il constitue, selon l'expression typique de son éminent « préfacier », une véritable encyclopédie.

Les Electroaimants et les bobines d'induction, par H. de Graffigny, Ingénieur civil, directeur de l'Institut électrotechnique de l'Ecole du Génie civil. 1 vol. in-18, de 200 pages, avec 116 figures. Librairie Desforges, 1922.

L'électromagnétisme est la branche la plus importante de l'électrotechnique, car il n'est pas d'application de l'électricité qui n'en dérive. L'électroaimant est un organe qui se rencontre dans quantité de mécanismes de commande et qui emprunte des formes très variées. La bobine d'induction, d'autre part, est un appareil qui rend les plus grands services et qui a reçu de très sérieux perfectionnements au cours de ces dernières années.

Le nouvel ouvrage de H. de Graffigny contient et résume toutes les connaissances qu'il peut être utile de posséder sur ces deux classes d'instruments, au double point de vue de la construction et des applications. Aidé d'une abondante illustration, il permettra à l'amateur comme au praticien de comprendre les phénomènes de l'induction et d'en tirer tout le parti qu'il est raisonnable d'espérer.

(1) Numéro de mars 1921, p. 151.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 8 novembre 1922 :
Admission de membres titulaires, p. 465. — Membres décédés, p. 466. — Dons
à l'Ecole, p. 466 — Horloges entretenues électriquement destinées à l'usage
courant (M. Marius LAVET), p. 467 — Les ampoules à rayons X et leur fabrication
(résumé), (M. JOHANNÈS), p. 516.

BIBLIOGRAPHIE, p. 517.

IL Y A TRENTE ANS, p. 520.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 8 novembre 1922. (1)

Présidence de M. Marcel BRILLOUIN.

La séance est ouverte à 20 h 30.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

- Cirilli** (Fernand-Louis), Ingénieur, directeur commercial de la Société anonyme française Très haute Tension, 6, rue des Volontaires, à Paris, 15°. — Présenté par MM. Sudria et Barbillion.
- Colardeau** (Paul), Ingénieur aux Etablissements Crochat, 30, rue de Tilsitt, à Paris, 17°. — Présenté par MM. Dutilh et Périolier.
- Colemonts** (Joseph-Arnold), Ingénieur à la Société anonyme des Etablissements Blériot, 18, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Iglésis et Ranjard.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Hallopeau (François-Alfred-Henri), Ingénieur E. S. E., 4 cité de Varenne, à Paris, 7^e. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Lebon (Jean-Auguste), Ingénieur à la Compagnie des Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée, 59, boulevard de Vaugirard, à Paris, 15^e. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Monnier (Alfred-Michel), Ingénieur aux Etablissements Lévy et Monnier, 11 bis, rue de Toricelli, à Paris, 17^e. — Présenté par MM. Bossu et Leblanc.

Pouchol (Charles-Hector), Ingénieur à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, 22, rue du Printemps, à Paris, 17^e. — Présenté par MM. Leblanc et Gratzmuller.

Spille (Louis-Marie), Ingénieur à la Société anonyme des Etablissements Blériot, 42, rue Saint-Germain, à Houilles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Ranjard et Iglésis.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Bouty, Castanheiras das Neves, Clifton, Geneux, Laporte, Loreau, Street*. Il adresse aux familles de ces membres les condoléances de la Société.

M. le PRÉSIDENT fait part du don suivant :

Ecole :

Maison J. Carpentier. Réparation d'un voltmètre thermique.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

M. le PRÉSIDENT rappelle en termes émus la carrière scientifique de MM. Bouty et Laporte, ainsi que leur longue participation aux travaux et au développement de la Société.

HORLOGES ENTRETENUES ÉLECTRIQUEMENT DESTINÉES A L'USAGE COURANT

L'étude se rapporte plus spécialement aux horloges à pendule entretenu électriquement, destinées à l'usage courant. Pendant ces dernières années, ces horloges ont reçu d'importants perfectionnements encore peu connus du public et certaines d'entre elles sont susceptibles de fonctionner sans intervention pendant de nombreuses années à l'aide d'une petite pile et de présenter plus de robustesse et de régularité que les horloges mécaniques ordinaires.

Après avoir examiné les conditions générales à remplir ainsi que les différents principes sur lesquels sont basés les systèmes réalisés jusqu'à ce jour, l'auteur expose les avantages du mode d'entretien Féry par impulsion électromagnétique périodique et décrit, d'après les brevets d'invention, les principales formes de réalisation proposées récemment.

M. M. LAVET. — « Depuis les premières applications de la télégraphie, d'innombrables dispositifs électriques ont été proposés pour effectuer la mesure du temps, mais leurs applications sont très limitées et l'antique pendule mécanique à poids ou à ressort est à peu près restée sans concurrence, du moins pour les applications domestiques courantes.

» La pendule électrique a généralement la réputation d'être un instrument délicat et compliqué dont le fonctionnement capricieux exige l'utilisation de piles donnant lieu à de multiples ennuis. Les horlogers la considèrent le plus souvent comme une originalité inutile présentant tout au plus un intérêt de curiosité. Certains d'entre eux ont même la conviction que toutes les recherches dans cette spécialité sont condamnées à un échec certain.

» Dans un ouvrage très récent consacré au pendule ⁽¹⁾, un physicien écrit à propos de l'horlogerie électrique :

« On ne saurait croire l'ingéniosité dépensée et le nombre de brevets pris pour le seul but d'éviter que nous ayons à remonter nos pendules ; il est vrai qu'on nous force à entretenir des piles et à compliquer le mécanisme ; c'est une très curieuse aberration économique, etc... »

» Ainsi donc, actuellement, beaucoup de personnes compétentes doutent de l'intérêt de l'application de l'électricité à la chronométrie usuelle et sont même fermement convaincues de l'impossibilité d'établir des instruments horaires électriques présentant autant de sûreté de fonctionnement et de commodités d'emploi que les systèmes mécaniques ordinaires.

» Cette opinion courante est généralement basée sur les très

⁽¹⁾ BOUSSE. *Cours de Physique*, 1920, t. II., Pendule spiral, Diapason, p. 202.

mauvais résultats obtenus avec les premières horloges électriques et sur la connaissance des difficultés très sérieuses qui se sont longtemps opposées à leur perfectionnement.

» Mais, depuis ces premiers essais malheureux, des travaux importants se sont poursuivis sans interruption pour faire bénéficier l'horlogerie des merveilleuses ressources offertes par l'énergie électrique et ils ont abouti à la création d'appareils industriels présentant une supériorité incontestable sur les anciens systèmes mécaniques.

» Bien que ces appareils soient de plus en plus fréquemment utilisés pour les grandes installations de distribution de l'heure et cela, malgré le discrédit où est tombée l'horlogerie électrique, leurs intéressantes propriétés sont encore peu connues, non seulement du public, mais encore des spécialistes électriciens et horlogers.

» Je me propose d'exposer brièvement les principes généraux qui ont été envisagés pour appliquer l'électricité à la mesure du temps et j'étudierai avec plus de détails les modes de réalisation de l'un d'entre eux qui semble s'être révélé supérieur aux autres au point de vue pratique.

» Cette étude sera limitée aux horloges indépendantes, à balancier entretenu électriquement, destinées aux usages courants.

I — RESSOURCES OFFERTES PAR L'APPLICATION DE L'ELECTRICITE A L'HORLOGERIE

» J'examinerai tout d'abord les ressources offertes par l'électricité dans son application à l'horlogerie.

» Tout instrument horaire comporte une source d'énergie produisant le déplacement d'un organe indicateur dont on s'efforce de régulariser la vitesse. On a été conduit à utiliser comme source d'énergie des générateurs électriques, parce que ces derniers permettent de fournir, pratiquement, un travail beaucoup plus grand que les accumulateurs mécaniques auxquels on a recours habituellement.

» Comparons, par exemple, l'énergie que peut débiter un élément ordinaire de pile, tel que ceux qu'on utilise dans les installations courantes de sonnerie, à celle que permettent d'emmagasiner les poids et ressorts moteurs des pendules ordinaires.

» L'élément de pile considéré est susceptible de fournir une énergie de 50 watts-heure équivalents à 18 000 kilogrammètres.

» Les horloges astronomiques fonctionnent pendant un mois, environ, à l'aide d'un poids d'à peu près 5 kg tombant de 1 mètre.

» Certaines horloges grossières de la Forêt-Noire fonctionnent pendant un jour en utilisant la chute d'un poids de 500 grammes d'une hauteur de 1 mètre.

» Le ressort moteur d'une montre ordinaire fait tourner le barillet de 5 tours en développant un couple variant entre 300 centimètres-grammes et 500 cm-g environ. L'énergie emmagasinée, qui s'élève à environ 0,15 kilogrammètre, assure le fonctionnement de la montre pendant un jour.

» Pour un gros ressort de pendule ordinaire, le couple maximum atteint 10 centimètres-kilogrammes et l'énergie fournie s'élève à 2 kilogrammètres. Cette énergie fait fonctionner la pendule pendant une semaine.

» Il serait difficile d'utiliser des ressorts beaucoup plus puissants, car cela en entraînerait de gros inconvénients pratiques. (Pressions élevées, nécessité d'une trop grande démultiplication entre l'arbre du barillet et la roue d'échappement.)

» On voit donc que les piles et accumulateurs électriques permettent de fournir une énergie considérablement plus élevée que les accumulateurs mécaniques.

» De plus, l'électricité permet de communiquer directement au pendule les impulsions motrices sans organes mécaniques intermédiaires, par exemple, grâce à une action électromagnétique s'exerçant entre deux organes, dont l'un est solidaire du pendule et l'autre fixe. Le pendule établit seulement un contact électrique et, parfois, actionne les aiguilles. Nous verrons plus loin que ces fonctions peuvent être assurées avec une dépense d'énergie très minime et que le rendement de certaines pendules électriques considérées comme des moteurs électriques est très élevé (0,8). Cela a permis de réduire la consommation annuelle à moins d'un watt-heure, de sorte que le fonctionnement peut être assuré pendant plusieurs années au moyen d'une simple petite pile.

» Avant de décrire les principaux modes d'entretien électrique des pendules et d'en analyser les conditions de fonctionnement, je vais rappeler brièvement les principes généraux de réalisation des instruments horaires.

II. — PRINCIPES DE REALISATION DES INSTRUMENTS HORAIRES

» Dans les instruments horaires courants ⁽¹⁾, l'organe régulateur est constitué par une pièce animée d'un mouvement pendulaire, soumise à des forces motrices chargées d'entretenir le mouvement et à des résistances passives. On s'efforce d'obtenir une fréquence constante des oscillations malgré les inévitables variations de certains des facteurs influant sur cette fréquence et on rend la rotation des aiguilles proportionnelle au nombre d'oscillations de l'organe régulateur.

» Les principaux facteurs susceptibles d'amener des variations dans la fréquence sont les suivants :

» 1° Température agissant sur la longueur des pendules et sur le coefficient d'élasticité des ressorts ;

» 2° Pression barométrique, agissant sur l'amortissement dû à la résistance de l'air ;

» 3° Variations des frottements mécaniques avec la lubrification, l'état hygrométrique de l'air, etc... ;

» 4° Variations des forces motrices lorsqu'elles dépendent de l'état de tension d'un ressort ou de la force électromotrice d'une source d'électricité, etc...

» L'influence de la température se traduit, pour les pendules à tige d'acier, par un retard d'environ une demi-seconde par jour et par degré d'échauffement. Lorsque l'organe réglant est constitué par un balancier circulaire associé à un ressort spiral en acier ordinaire, les variations du coefficient d'élasticité du métal avec la température introduisent des perturbations beaucoup plus grandes. Le retard journalier atteint, dans ce cas, 10 secondes par degré d'échauffement, soit 20 fois plus que dans le cas du pendule.

» Dans tous les cas, l'influence de la température sur la pé-

(1) Au lieu de partir d'un mouvement oscillatoire alternatif, on peut partir d'un mouvement de rotation régularisé par un pendule conique ou par un régulateur de vitesse à force centrifuge à action indirecte (système de distribution d'heure Thury, figurant à l'Exposition universelle de 1900). On a proposé d'utiliser un petit moteur, analogue à celui du compteur O'Keenan, fonctionnant à tension constante. Tous ces systèmes n'ont pas permis d'obtenir autant de précision que les balanciers. Le mouvement de rotation d'un moteur de compteur O'K ou d'un compteur à champ tournant peut être régularisé par un échappement (Brevets : Satori, n° 319 443, 1902, et O'Keenan, n° 449 875, 1912).

riode peut être compensée en faisant usage de pendules bi-métalliques ou en utilisant la déformation de ressorts spéciaux. La tendance actuelle est, d'ailleurs, de supprimer toute compensation (ou de réduire l'importance des corrections à introduire) en faisant usage d'alliages métalliques peu influencés par la température dans les limites ordinaires. (On constitue les pendules avec de l'acier spécial au nickel dont le coefficient de dilatation est négligeable (Invar) et les spiraux avec de l'acier spécial au nickel-chrome, dont le coefficient thermoélastique est très faible (Elinvar de M. Guillaume). ⁽¹⁾

» L'influence des variations de la pression barométrique est négligeable dans l'horlogerie courante.

» Ce sont les variations des frottements et des impulsions motrices qui introduisent les perturbations les plus difficiles à éviter. On y parvient en utilisant les propriétés des mouvements pendulaires sinusoïdaux.

» On sait que le mouvement pendulaire sinusoïdal est celui que prend un balancier mobile autour d'un axe, soumis à un couple de rappel C proportionnel à l'angle θ dont il tourne par rapport à une position dite d'équilibre.

» Lorsqu'il n'y a pas d'amortissement ni de couple directeur, l'équation différentielle du mouvement est :

$$K \frac{d^2\theta}{dt^2} + C\theta = 0 \quad (K, \text{moment d'inertie du balancier}).$$

» Si, par exemple, au temps $t = 0$, on a $\frac{d\theta}{dt} = \omega_0$ (ω_0 étant la vitesse de passage par la position d'équilibre), l'équation du mouvement est

$$\theta = \omega_0 \sqrt{\frac{K}{C}} \sin\left(\sqrt{\frac{K}{C}} \times t\right)$$

» La période est $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{C}}$. Cette période est indépendante de la vitesse ω_0 de passage du balancier par la position d'équilibre.

» Lorsque le mouvement oscillatoire tend à être amorti par un couple γ prenant des valeurs faibles par rapport à $C\theta$, le temps qui s'écoule entre le passage du balancier par la position d'équilibre à la vitesse $+\omega_0$ et le passage suivant par cette même po-

⁽¹⁾ Voir à ce sujet le très intéressant ouvrage de M. Ch.-Ed. GUILLAUME: *La Compensation des horloges et des montres*, 1922.

sition à la vitesse $+\omega_0 - \Delta\omega_0$ est différent de T . Mais la variation de la période T est du second ordre, par rapport à la variation de vitesse entre deux passages consécutifs par la position d'équilibre.

» De plus, lorsque le couple d'amortissement γ est proportionnel à la vitesse (résistance visqueuse) ou lorsqu'il est constant (cas d'un frottement constant), les oscillations conservent leur propriété d'avoir une durée (comptée entre deux passages dans le même sens par la position d'équilibre) indépendante de la vitesse.

» Il s'ensuit que, dans un mouvement oscillatoire sinusoïdal amorti dans les conditions spécifiées, si l'on entretient le mouvement par une succession de chocs s'exerçant sur le balancier lorsque celui-ci passe par la position d'équilibre, les vitesses ω_0 peuvent varier, mais les durées des oscillations complètes restent invariables malgré les irrégularités qui peuvent se produire dans les valeurs des chocs.

» C'est cette précieuse propriété des oscillations de rester isochrones, malgré les variations de certaines impulsions motrices, qui a permis de mesurer le temps avec une extraordinaire précision, l'erreur relative étant inférieure à 10^{-4} dans les instruments horaires les plus grossiers et pouvant être réduite à moins de 10^{-6} dans les horloges de précision.

» Les règles ordinairement admises pour la réalisation des instruments horaires découlent des propriétés qui viennent d'être rappelées. Ces règles sont les suivantes :

» 1° Les forces d'amortissement s'exerçant pendant toute la durée de l'oscillation (tels que frottement de l'air, frottement des pivots) sont rendues aussi faibles que possible ;

» 2° Les forces retardatrices et motrices notables sujettes à des variations importantes sont exercées pendant une durée très brève, lorsque l'organe réglant passe par la position d'équilibre.

» Dans ces conditions, la fréquence est maintenue sensiblement constante, malgré les variations dans les forces motrices et retardatrices. Mais il est essentiel de remarquer que ce résultat n'est atteint que lorsque l'on a un mouvement pendulaire sinusoïdal (couple de rappel proportionnel à l'angle de rotation).

» L'organe réglant peut être constitué par un pendule ou par un balancier circulaire équilibré associé à un ressort en forme de spirale ou d'hélice. On a également utilisé des pendules de tor-

sion (masse mobile suspendue par un fil élastique dont une extrémité est fixée à un support fixe et l'autre est reliée à la masse mobile).

» C'est le pendule qui permet d'obtenir une période constante avec le plus de facilité, car on peut augmenter considérablement le moment d'inertie sans accroître les frottements, le pendule pouvant être suspendu au moyen de lames flexibles. Généralement, on s'efforce d'entretenir le mouvement au moyen de chocs s'exerçant lorsque le pendule passe par la verticale et on limite le plus possible l'amplitude, car le couple de rappel dû à la pesanteur est de la forme $P l \sin \theta$ et il n'est sensiblement proportionnel à θ que si θ est extrêmement faible (règles indiquées par Lippmann).

» Lorsque l'instrument horaire doit fonctionner tout en étant déplacé, on doit recourir au balancier circulaire associé à un ressort (montre, chronomètre de marine). Mais la précision est alors très difficile à obtenir, car l'amortissement dû aux frottements des pivots devient relativement considérable. De plus, l'isochronisme du système balancier-ressort n'est obtenu que difficilement et par tâtonnements. La compensation de la température est aussi plus délicate.

III. — GENERALITES SUR LES PENDULES ENTRETENUS ELECTRIQUEMENT. — PRINCIPE ET CLASSIFICATION

» Dans l'étude qui va suivre, je considérerai, tout d'abord, le cas des pendules entretenus électriquement. Les modes d'entretien des pendules peuvent évidemment s'appliquer d'une façon analogue aux balanciers circulaires ; mais l'emploi de l'électricité entraîne alors des difficultés spéciales sur lesquelles j'attirerai votre attention.

» Pour les pendules entretenus électriquement, il y a lieu de considérer, indépendamment des causes d'amortissement ordinaires, les pertes d'énergie dues à la commande des aiguilles et à la commande directe ou indirecte du contact électrique chargé de déclencher les impulsions motrices.

» Dans certains systèmes, la commande des aiguilles est effectuée indirectement par un contact électrique. Il semble que cette dernière disposition doive permettre de réduire les résistances passives. En réalité, et contrairement à l'opinion courante,

l'énergie nécessaire à la manœuvre de petites aiguilles peut être rendue très inférieure à celle que l'on est conduit à dépenser pour établir, dans de bonnes conditions, le contact électrique qui assure la commande d'un compteur horaire.

» Dans la plupart des horloges électriques, ce sont les pertes mécaniques entraînées par la manœuvre du contact électrique qui sont prépondérantes et le pendule est parfois soumis à des résistances passives plus importantes que dans les systèmes mécaniques.

» Nous avons vu que la propriété des oscillations du pendule d'être isochrones pour de petites amplitudes permet d'établir des instruments horaires dont le réglage n'est pas influencé par les

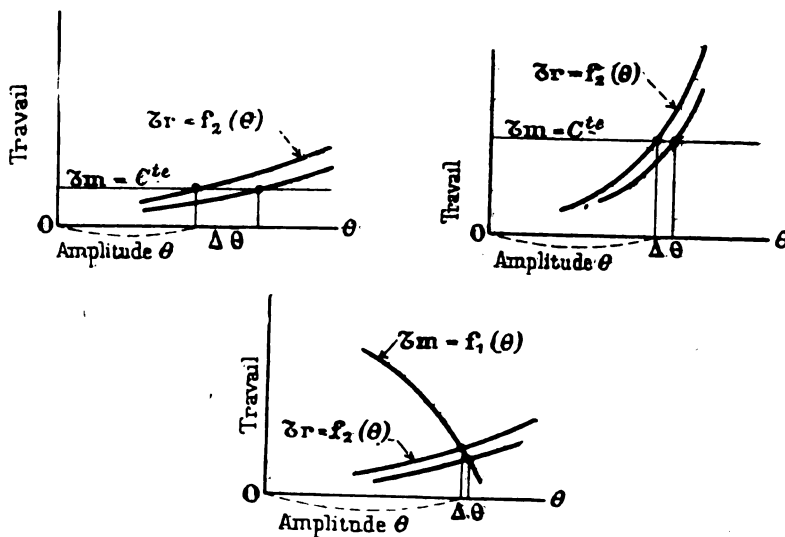


Fig. 1, 2 et 3. — Courbes caractéristiques du travail moteur et du travail résistant en fonction de l'amplitude.

variations des impulsions motrices ; mais les conditions théoriques qui permettent d'atteindre ce résultat sont difficiles à observer en pratique et l'on n'obtient qu'un isochronisme plus ou moins approché.

» On est conduit, par suite, à chercher à réduire le plus possible les variations d'amplitude.

» Remarquons que le pendule prend une amplitude de régime pour laquelle le travail résistant moyen est égal au travail moteur moyen.

» En général, le travail résistant moyen croît assez peu avec

l'amplitude. Une faible variation du travail moteur peut donc entraîner une variation d'amplitude relativement considérable.

» Il est intéressant de considérer, dans les horloges électriques, les courbes caractéristiques $\tau_m = f_1(\theta)$ et $\tau_r = f_2(\theta)$ (travail moteur moyen et travail résistant moyen en fonction de l'amplitude) ; l'amplitude de régime correspond à la rencontre des deux courbes.

» Si τ_m est constant et si τ_r varie peu avec θ , la moindre variation de τ_r conduit à une variation importante de l'amplitude (fig. 1).

» La variation d'amplitude est évidemment réduite lorsque τ_r croît rapidement ou bien lorsque τ_m décroît rapidement quand θ augmente (fig. 2 et 3).

» Les systèmes d'entretien diffèrent par les moyens employés pour réduire les variations de l'amplitude.

» Dans certains systèmes, pour obtenir la régularité de la marche, on a cherché à restituer au pendule un travail constant à chaque oscillation. Dans d'autres systèmes, on a cherché à limiter les variations d'amplitude en faisant décroître l'intensité ou le nombre des impulsions motrices lorsque l'amplitude augmente. Parfois, même, on a produit un freinage supplémentaire croissant avec l'amplitude.

» J'examinerai les principaux modes d'entretien électriques des pendules en adoptant la classification suivante :

» A) *Systèmes d'entretien électrique à restitution constante.* — 1° Au moyen d'impulsions mécaniques constantes déclanchées électriquement ; 2° Au moyen d'impulsions électromagnétiques constantes.

» B) *Systèmes d'entretien au moyen d'impulsions dont le nombre décroît lorsque l'amplitude augmente.* — 1° Impulsions électromagnétiques commandées par un contact, qui est supprimé lorsque l'amplitude de régime est dépassée ; 2° Impulsions mécaniques supprimées lorsque l'amplitude de régime est dépassée.

» C) *Systèmes d'entretien avec freinage supplémentaire* (Freinage mécanique, magnétique ou électromagnétique croissant avec l'amplitude).

» D) *Systèmes d'entretien au moyen d'impulsions motrices décroissant avec l'amplitude.* — 1° Durée de contact décroissant

avec l'amplitude ; 2° Point de fermeture du contact variant avec l'amplitude ; 3° Impulsions électromagnétiques décroissant automatiquement avec l'amplitude.

IV. — EXAMEN DES MODES D'ENTRETIEN DES PENDULES

» A) SYSTÈME D'ENTRETIEN ÉLECTRIQUE A RESTITUTION CONSTANTE. --
1° *Impulsions mécaniques constantes.* — Dans ce mode d'entretien, on s'efforce de restituer une quantité d'énergie mécanique constante, indépendante de l'énergie électrique fournie au système.

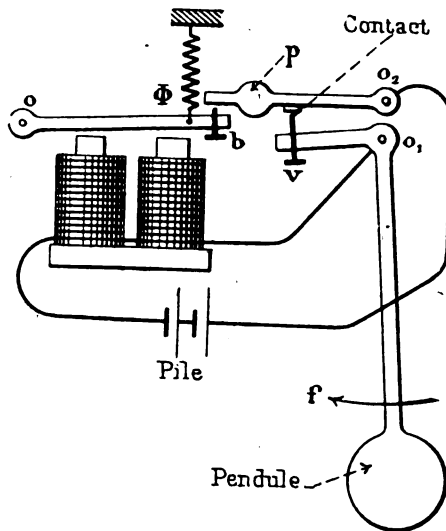


Fig. 4. — Dispositif Ch. Féry d'entretien des pendules par impulsions mécaniques constantes.

» On a proposé, depuis 1855, un nombre considérable de dispositifs basés sur ce principe (systèmes de Vérité, Froment, Garnier, Detouche, Grasset, Lassau, Gérard, Liais, Geist, Kramer, Féry, Campiche, etc...).

» Je décrirai, à titre d'exemple, le dispositif imaginé par M. Ch. Féry, faisant l'objet de son brevet n° 254 092 de 1896. Ce système est représenté dans la figure 4. Quand le pendule se déplace dans le sens f , la vis v soulève la masse p d'une hauteur H et en même temps établit un contact électrique.

» Au retour, la masse p agit pendant un parcours plus long ($H + h$), car la butée b solidaire de l'armature de l'électroaimant, est abaissée par suite du passage du courant. L'armature est ra-

menée à la position initiale dès que v quitte p . Le pendule reçoit donc, à chaque oscillation, une énergie constante $p h$.

» Ce système vient d'être imité tout récemment par une maison étrangère. La figure 5 représente le mécanisme moteur de cette horloge. ⁽¹⁾

» Comme autre exemple d'entretien à force constante, je décrirai le dispositif faisant l'objet du brevet n° 413 191, 1910, de M. Charles Féry. Ce dispositif est représenté schématiquement sur la figure 6. L'inventeur s'est proposé non seulement de restituer au pendule, à chaque oscillation, une énergie constante et indépendante de la source d'électricité, mais encore de produire l'im-

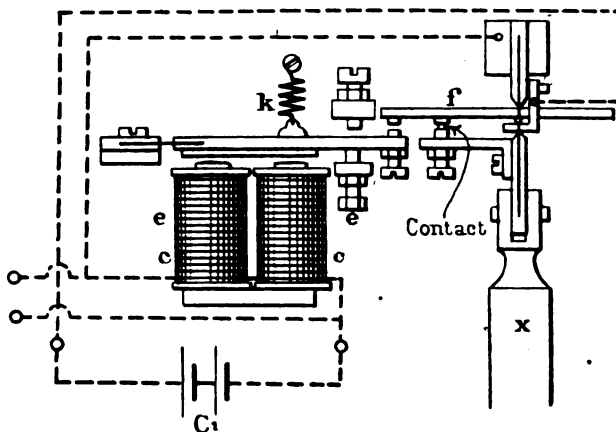


Fig. 5. — Réalisation du mécanisme moteur du dispositif Ch. Féry d'entretien des pendules à force constante.

pulsion au voisinage immédiat de la verticale et de laisser le pendule osciller librement dès qu'il s'écarte de celle-ci. Ces conditions sont évidemment favorables à la régularité des oscillations.

» A l'extrémité du pendule est disposée une roulette A_1 destinée à agir sur une autre roulette portée par un levier pivotant B , sur lequel vient peser une masse M que cesse de retenir l'armature de l'électroaimant E , lorsque cette armature est attirée sous l'action d'un courant électrique. Ce courant est établi lorsque le pendule, se déplaçant dans le sens f , commence à agir sur le levier B . La roulette A_2 pousse ensuite le pendule hors de la verticale en lui donnant une impulsion indépendante de la tension.

⁽¹⁾ La nouvelle pendule électrique de précision de la maison suisse Favarger et C^e, décrite dans l'ouvrage de A. WAELTI, 1921 (Magron, éditeur, Suisse).

» 2° *Impulsions électromagnétiques constantes.* — Les impulsions motrices peuvent être communiquées au pendule sans organes mécaniques intermédiaires par une action électromagnétique s'exerçant entre une bobine fixe et un aimant permanent

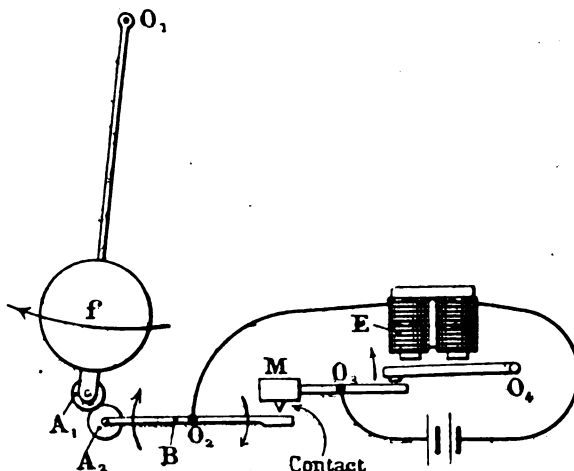


Fig. 6. — Variante du système Ch. Féry d'entretien des pendules à force constante.

solidaire du pendule (ou réciproquement). On peut se proposer de donner une impulsion constante en envoyant dans la bobine une quantité d'électricité constante. La grandeur de l'impulsion ne dépend que de cette quantité d'électricité et non de la résis-

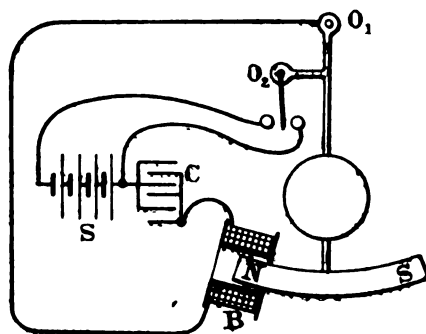


Fig. 7. — Dispositif de Grégory pour l'entretien des pendules par impulsions électromagnétiques.

tance du circuit. Toutefois, il y a lieu de remarquer que les effets mécaniques de l'impulsion peuvent dépendre de la loi suivant laquelle elle s'effectue lorsque sa durée n'est pas infiniment courte. (1)

(1) Voir BOVASSE. *Cours de Physique*, 1920, t. II ; Pendule spiral, Diapason, page 210.

» Je citerai comme exemple d'entretien par impulsions électromagnétiques constantes le dispositif proposé par Grégory en 1889 et représenté sur la figure 7. Le pendule reçoit des impulsions aux instants de la charge et de la décharge du condensateur C (la source S étant à tension constante). Le solénoïde S est traversé par des quantités d'électricité constantes alternativement dans les deux sens chaque fois que le pendule passe par la verticale.

» La figure 8 représente schématiquement le pendule dit à restitution constante établi en 1900 par M. Ch. Féry.

» Le solénoïde S reçoit une quantité d'électricité constante induite dans la bobine B, lorsque la palette de A se rapproche brusquement de l'aimant $N_2 S_2$; la quantité d'électricité induite est indépendante de la vitesse de la palette. Cette dernière est ma-

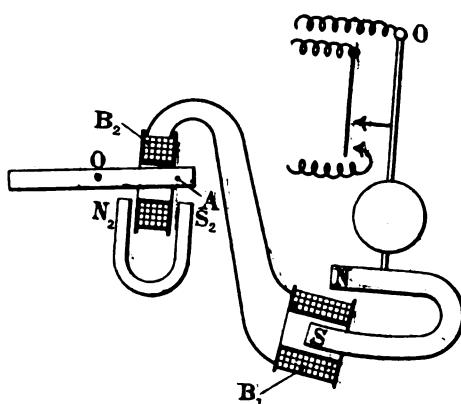


Fig. 8. — Schéma du pendule à restitution constante de Ch. Féry.

noeuvrée, chaque fois que le pendule passe par la verticale, au moyen d'un courant auxiliaire fourni par une pile et envoyé aux instants convenables grâce à un commutateur spécial actionné par le pendule, mais établi pour n'apporter aucune perturbation dans la marche de ce dernier. Cette disposition permet d'éliminer l'influence des variations de la pile.

» B) SYSTÈMES D'ENTRETIEN AU MOYEN D'IMPULSIONS DONT LE NOMBRE DÉCROÎT LORSQUE L'AMPLITUDE AUGMENTE. — 1° *Cas d'impulsions électromagnétiques.* — Le pendule reçoit aux instants favorables des impulsions électromagnétiques, grâce à un contact électrique manœuvré par le pendule. Ces impulsions tendraient à donner au pendule une amplitude exagérée, mais on supprime le contact électrique dès que l'amplitude dépasse la valeur de régime que l'on veut imposer au pendule.

» Un exemple très ingénieux de ce mode d'entretien est fourni par le contact de Foucault (1860), vulgarisé par Hipp, horloger suisse.

» La pendule bien connue de Hipp est représentée schématiquement sur la figure 9.

» Si les oscillations ont une amplitude suffisante, la palette *p*, très mobile, passe librement d'un côté et de l'autre de la pièce *M* portée par le pendule. Il n'y a pas de contact, mais, si l'amplitude diminue par trop, la pointe *p* vient s'engager dans la dent de la pièce *M* ; la palette est soulevée et un contact est établi

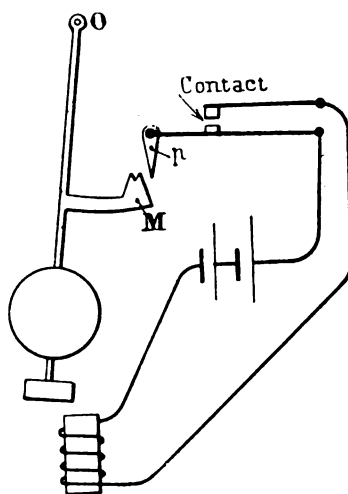


Fig. 9. — Pendule de Hipp à impulsions électromagnétiques et à amplitude limitée.

grâce auquel le pendule reçoit une impulsion motrice par un dispositif électromagnétique moteur approprié. Ainsi l'impulsion est donnée de temps en temps chaque fois que l'amplitude descend au-dessous d'une certaine valeur.

» 2° *Cas d'impulsions mécaniques.* -- On peut aussi établir le contact électrique à chaque oscillation du pendule et produire de la sorte la mise en action d'un dispositif électromécanique auxiliaire. D'autre part, au moyen d'un mécanisme influencé par l'amplitude, on peut ne transmettre au pendule l'action de ce dispositif moteur auxiliaire que lorsque l'amplitude est inférieure à une valeur donnée.

» Sur ce principe repose l'horloge électrique faisant l'objet du

brevet français Andersen n° 489 463, 1918. Le résultat n'est obtenu qu'avec une dépense considérable de moyens mécaniques.

» C) PENDULES ENTRETENUS AVEC RÉGLAGE DE L'AMPLITUDE PAR FREINAGE AUXILIAIRE. — Dans ces systèmes, on ne prend aucune précaution particulière pour limiter l'intensité ou le nombre des impulsions motrices sujettes à variation, mais on crée un freinage auxiliaire croissant rapidement avec l'amplitude des oscillations. Remarquons que ces systèmes paraissent théoriquement incorrects, car, dans un mouvement oscillatoire quelconque, on peut très bien maintenir l'amplitude constante sans pour cela régulariser la fréquence, seul facteur intéressant pour la mesure du temps. Si, par exemple, un pendule oscille entre deux butées fixes, on conçoit qu'il puisse osciller entre ces deux butées à des fréquences variables. Le freinage joue un rôle analogue à celui de ces butées.

» Toutefois, lorsque, pour un balancier oscillant librement, le couple de rappel vers la position d'équilibre n'est pas proportionnel à l'angle de rotation (par exemple dans le cas d'un pendule aux grands arcs), les oscillations ne sont pas isochrones et, si l'on ajoute l'action d'un freinage auxiliaire croissant avec l'amplitude, celui-ci peut avoir pour effet d'améliorer l'isochronisme. On peut ainsi expliquer les résultats expérimentaux assez satisfaisants obtenus par certains inventeurs qui, d'ailleurs, justifient leur conception par des raisonnements manifestement erronés.

» Comme exemple de tels modes d'entretien, je citerai les systèmes Bentley, faisant l'objet des brevets anglais n° 19 044, de 1910, et 8 461, de 1913.

» Dans ces inventions, le contact électrique est fermé de telle sorte que l'impulsion électromagnétique est motrice dans une partie de la course du pendule et retardatrice dans l'autre partie. L'effet retardateur croît avec l'amplitude et produit ainsi le réglage.

» Un freinage auxiliaire par courants de Foucault a été également utilisé dans certaines horloges construites par la maison suisse Favarger. Dans ce cas, l'amortissement étant proportionnel à la vitesse, l'isochronisme n'est pas troublé.

» D) PENDULES ENTRETENUS AU MOYEN D'IMPULSIONS MOTRICES DÉCROISSANT LORSQUE L'AMPLITUDE AUGMENTE. — 1° *Chemin parcouru par la force motrice décroissant lorsque l'amplitude croît.* — On conçoit la possibilité de réaliser un contact électrique commandé

par le pendule de telle sorte que la force motrice s'exerce sur un parcours de plus en plus réduit au fur et à mesure que l'amplitude croît. On pourrait pour cela utiliser, par exemple, les effets variables de la vitesse de passage du pendule par la verticale. L'impulsion motrice serait alors fournie par une action électromagnétique ou par une action mécanique provoquée par un dispositif électro-moteur agissant indirectement.

» *2° Variation du point de fermeture du contact lorsque l'amplitude croît.* — Une modification de la valeur des impulsions électromagnétiques peut être obtenue en faisant varier le point de fermeture du contact avec l'amplitude.

» Un exemple de ce mode de réglage est donné par le dispositif

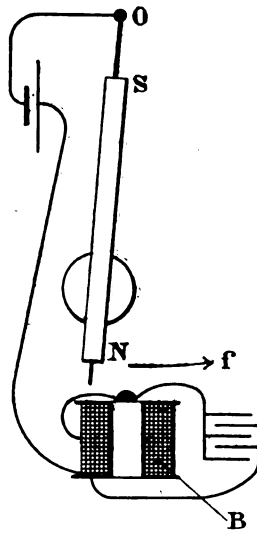


Fig. 10. — Pendule Ch. Féry à réglage par variation du point de fermeture d'un contact.

imaginé par M. Ch. Féry et décrit dans son brevet n° 445 152, février 1913.

» Dans cette invention, le pendule, dont la tige est un aimant N S, peut être repoussé par une bobine B, disposée dans le prolongement du pendule, lorsque celui-ci passe par la verticale.

» Lorsque le pendule se déplace à droite de la verticale, l'effet de répulsion se traduit par une composante tangentielle dans le sens f, dont l'intensité est d'autant plus faible que le pôle de l'aimant est plus éloigné de la bobine (fig. 10).

» Si les émissions de courant sont envoyées dans la bobine après

le passage par la verticale avec un retard constant, l'impulsion se produira lorsque le pôle de l'aimant sera plus ou moins éloigné de la bobine et cela, suivant que la vitesse sera plus ou moins grande.

» M. Féry indique un moyen d'obtenir ce résultat en utilisant la self-induction du circuit. Ce mode d'entretien peut être appliqué au pendule de Foucault.

» 3° *Variation de l'intensité des impulsions avec l'amplitude.* — Ce mode d'entretien peut être réalisé très simplement à l'aide du dispositif représenté sur la figure 11 ; le pendule porte un aimant A pouvant être aspiré par une bobine B, lorsque celle-ci est parcourue par un courant fourni par la pile P et envoyé au

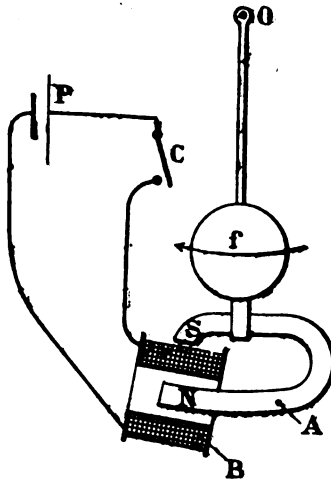


Fig. 11. — Schéma d'un dispositif permettant l'entretien d'un pendule par variation de l'amplitude des impulsions. Dispositif Ch. Féry.

moyen du contact C. Le levier du contact C est commandé par le pendule de telle sorte que le contact soit fermé pendant la partie bien déterminée de la course du pendule dans le sens f.

» Ainsi, la force électromagnétique s'exerce sur un parcours constant, mais son intensité décroît automatiquement lorsque l'amplitude croît, par suite de la production d'une force contre-électromotrice d'induction proportionnelle à la vitesse.

» On peut se rapprocher des règles indiquées par Lippmann pour rendre les oscillations isochrones, en limitant l'amplitude à une faible valeur et en produisant le contact pendant un temps très bref lorsque le pendule passe par la verticale. Le dispositif

de contact peut également être établi de telle sorte que la commande ne se produise que lorsque le pendule passe par la verticale, ce dernier oscillant librement ensuite.

» C'est encore à M. Ch. Féry que revient le mérite d'avoir indiqué ce mode d'entretien. Une forme d'exécution a été décrite par lui dans son brevet n° 313 144 de 1901, et les conditions de fonctionnement ont été précisées dans le certificat d'addition n° 4 209 à ce brevet.

» Les travaux de M. Féry ont été le point de départ d'intéressantes recherches poursuivies pendant ces dernières années. Je m'efforcerai d'en exposer les résultats en me basant sur les très nombreux brevets d'invention auxquels elles ont donné lieu. Mais, avant d'aborder cette étude, je crois utile d'analyser, avec quelques détails, les conditions de fonctionnement électrique du système représenté sur la figure 11 sous la forme la plus générale.

» Cela me permettra d'établir une comparaison entre les principaux modes d'entretien et de rectifier quelques idées courantes sur la valeur pratique de certains systèmes.

IV. — ETUDE DU FONCTIONNEMENT ELECTRIQUE DES PENDULES ENTRETENUS PAR IMPULSIONS ELECTROMAGNETIQUES DIMINUANT LORSQUE LA VITESSE CROIT.

» Le système électromagnétique moteur est représenté schématiquement sur la figure 12. Le pendule porte une bobine A de n spires, se déplaçant au voisinage de l'aimant fixe B (le fonctionnement est évidemment le même lorsque la bobine est fixe et l'aimant mobile).

» L'angle de rotation du pendule étant faible, on peut considérer que la bobine est animée d'un mouvement alternatif rectiligne entre les positions extrêmes A, B (fig. 13). Le mouvement peut être considéré comme sinusoïdal.

» Lorsque la bobine se déplace dans le sens f de D en E, voisins de la position d'équilibre C, elle est reliée aux bornes de la source P, entre lesquelles existe une différence de potentiel constante u .

» Dans le déplacement de la bobine de A vers B, le flux magnétique Φ dû à l'aimant traversant les n spires varie, par exemple, comme l'indique la courbe $\Phi = f_2(x)$ (fig. 14).

» Nous supposons que le courant traversant la bobine est

assez faible pour ne pas réagir sensiblement sur la répartition des lignes de force de l'aimant.

» Cette hypothèse peut être faite pour les horloges du type étudié lorsqu'elles sont convenablement établies. Dans ces conditions, la loi $\Phi = f_2(x)$, ne dépend que du champ magnétique créé par l'aimant permanent et des positions de la bobine par rapport à ce champ.

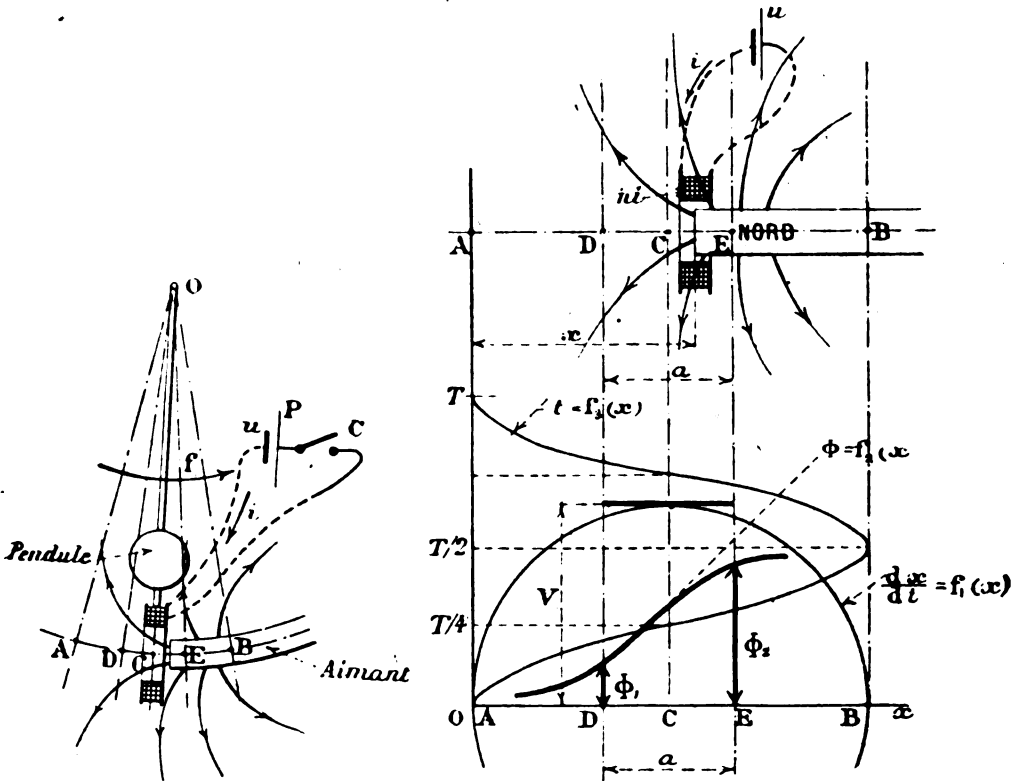


Fig. 12, 13 et 14. — Représentation schématique du fonctionnement électrique des pendules entretenus par impulsions électromagnétiques.

» Dans le parcours D E, la bobine reçoit une énergie élémentaire $uidt$, i désignant le courant instantané. Cette énergie se transforme en travail mécanique $nid\Phi$ et en chaleur nri^2dt (r résistance moyenne de 1 spire). On a un véritable moteur ma-

gnétoélectrique absorbant une intensité $i = \frac{u - n \frac{d\Phi}{dt}}{nr}$

» Dans le déplacement D E = a , le flux varie de Φ_1 à Φ_2 et nous

admettons, pour simplifier, que l'on puisse remplacer entre D et E la courbe $\varphi = f(x)$ par un élément de droite, de sorte que :

$$\frac{d\Phi}{dx} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{a} = C^{\text{te}}.$$

» Dans le même déplacement, la vitesse de la bobine reste très voisine de la valeur maximum V , qu'elle atteint lorsque le pendule passe par la verticale ; on peut donc la considérer comme constante. Il en résulte que la force contre-électromotrice d'induction est aussi constante, car :

$$n \frac{d\Phi}{dt} = n \frac{d\Phi}{dx} \times \frac{dx}{dt} = n \times \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{a} \times V. \quad (1)$$

$$\text{» On a : } i = \frac{u - nV \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{a}}{nr}. \quad (2)$$

» La durée de fermeture du contact correspondant au déplacement a est $t = \frac{a}{V}$ l'énergie électrique fournie est :

$$\int_0^t U i dt = U \times it = u \times \frac{a}{V} \times \frac{u - \frac{nV}{a}(\Phi_2 - \Phi_1)}{nr}$$

L'énergie perdue est :

$$nr i^2 t = \frac{a}{nrV} \left(u - nV \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{a} \right)^2.$$

L'énergie électrique transformée en énergie mécanique utile est :

$$\tau_m = \left(u - \frac{nV(\Phi_2 - \Phi_1)}{a} \right) (\Phi_2 - \Phi_1) \frac{1}{r} \quad (3)$$

Le rendement électrique est :

$$\rho = \frac{nV}{a} (\Phi_2 - \Phi_1) \times \frac{1}{u} \quad (4)$$

» L'expression (3) nous montre que le travail utile τ_m décroît lorsque V augmente, c'est-à-dire lorsque l'amplitude des oscillations est plus élevée.

» L'énergie est fournie à chaque oscillation complète du pendule. Elle doit compenser les pertes diverses τ_r s'opposant au mouvement pendant une période ; les pertes τ_r croissent, en général, lorsque l'amplitude et, par suite la vitesse V , augmentent.

» Les propriétés générales du système (*) sont mises en évidence sur la figure 15. Portons en abscisses les amplitudes.

(*) Voir POMEY. *Analogies mécaniques de l'électricité*, page 169.

» La tension de la pile est représentée par l'horizontale MN. La force contre-électromotrice e induite dans la bobine proportionnelle à la vitesse ou, ce qui revient au même, à l'amplitude, est représentée par OF. Pour une amplitude $\theta_r = OB_1$, le travail moteur par période τ_m est proportionnel à $A_1 F_1 = u - e_1$. Pour une certaine amplitude correspondant à l'intersection de OF et de MN. τ_m est nul. Le rendement ρ est alors égal à 1. Le rendement décroît en même temps que θ .

» τ_m , aux différentes amplitudes, peut être représenté par la droite PQ. Si l'on trace la courbe $\tau_r = f_2(\theta)$, on voit que l'intersection de cette courbe et de PQ correspond à l'amplitude de régime θ_r caractérisée par une certaine vitesse V pour laquelle les pertes mécaniques par période ont, par exemple, la valeur E .

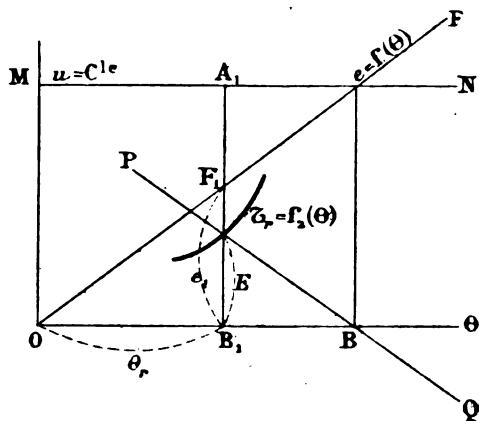


Fig. 15. — Représentation graphique de la relation existant entre le travail moteur, le travail résistant et la tension de la pile dans un pendule entretenu électriquement.

Pour obtenir l'entretien des oscillations du pendule à l'amplitude θ_r , il suffit de donner aux facteurs $u, \Phi_2 - \Phi_1, a, n$, et r des valeurs convenables pour satisfaire à la relation :

$$\left[u - \frac{n V (\Phi_2 - \Phi_1)}{a} \right] \left[\Phi_2 - \Phi_1 \right] \times \frac{1}{r} = E \quad (5)$$

» Il y a une infinité de solutions, mais les proportions adoptées peuvent être plus ou moins avantageuses.

» Le constructeur doit évidemment s'efforcer d'obtenir les résultats suivants : 1° réduire la consommation d'énergie électrique ; 2° réduire les perturbations de réglage dans le cas où les

frottements, la tension de la source, l'aimantation, la résistance du contact viendraient à varier ; 3° augmenter la robustesse et la sûreté de fonctionnement ; 4° réduire le prix de revient et l'encombrement des organes.

» La recherche des meilleures conditions d'établissement des organes électromagnétiques moteurs pose des problèmes assez délicats et l'on constate de grandes divergences dans les conceptions des inventeurs. C'est ainsi que, dans certaines horloges, on utilise des bobines de très petites dimensions, se déplaçant dans des entrefers très étroits ; dans d'autres, on fait usage de grosses bobines. Certains inventeurs préconisent l'utilisation des pôles d'aimant pénétrant dans la bobine ; d'autres, de pôles d'aimant se déplaçant devant la bobine. Dans certains modèles, les bobines sont très allongées, tandis que, dans d'autres, elles ont la forme de galettes extrêmement plates.

» D'une façon générale, les conditions à remplir sont les suivantes :

» En premier lieu, il faut diminuer le plus possible la consommation, cela non seulement pour réduire l'usure de la pile, mais encore pour que le contact électrique ne se détériore pas. Pour cela, il est nécessaire de diminuer les pertes mécaniques E et d'augmenter le rendement η . Les pertes mécaniques sont principalement entraînées par la dépense d'énergie nécessaire pour établir le contact électrique. On devra chercher à les réduire sans pour cela diminuer par trop la pression du contact. D'autre part, la relation (4) montre que, pour obtenir un bon rendement, il faut que la force contre-électromotrice d'induction $e = \frac{nV}{a} (\Phi_2 - \Phi_1)$ soit très voisine de u . Cette condition étant remplie, la différence $u - e$ est faible et, par suite, la relation (5) indique que le facteur $(\Phi_2 - \Phi_1)$ (variation du flux embrassé par la bobine) doit être élevé et que la résistance d'une spire doit être très faible. Il faut, par suite, que les spires soient d'une longueur aussi faible que possible (bien que suffisante pour embrasser le flux) et que le fil soit relativement gros. On vient de voir que le nombre n de spires doit être tel que $\frac{nV}{a} (\Phi_2 - \Phi_1)$ soit voisin de u .

» La théorie indique donc que l'on doit faire usage d'une grosse bobine, mais cela pourrait conduire à diminuer le facteur $\Phi_2 - \Phi_1$ et l'on est limité dans cette voie. D'autre part, on pourrait

être tenté d'augmenter le facteur $(\Phi_2 - \Phi_1)$ en faisant usage de gros aimants en fer à cheval présentant un très faible entrefer ; mais, dans ce cas, on doit employer des bobines de fil très fin et augmenter la longueur des spires, ce qui pourrait rendre illusoire le gain réalisé.

» On doit aussi tenir compte des nécessités de fabrication, ainsi que de l'obligation d'abaisser le prix de revient et de réduire l'encombrement des organes.

» Au point de vue chronométrique, il y a lieu de tenir compte de ce que la vitesse V ou, ce qui revient au même, l'amplitude, dépendent de la tension u de la source, de la variation de flux $\Phi_2 - \Phi_1$ et des pertes mécaniques E . La fréquence ne sera pas altérée si l'on a observé les règles de Lippmann pour obtenir l'isochronisme des oscillations malgré les variations inévitables dans les impulsions motrices. Le mode d'entretien étudié est donc susceptible de permettre une parfaite régularité de marche, malgré l'affaiblissement de la pile et des aimants et les variations des frottements. Il convient de remarquer que, lorsque le rendement est bon et que le travail résistant est faible, l'amplitude de régime diffère peu de OB (voir fig. 15), valeur qui dépend seulement de la tension de la source. Par suite, une variation du travail résistant relativement importante n'entraîne qu'une faible modification de l'amplitude des oscillations. Certaines piles étant susceptible de permettre une parfaite régularité de marche, malgré une constante, on peut limiter les variations d'amplitude à une très faible valeur. Nous verrons d'ailleurs que l'on a réussi à s'affranchir de l'obligation d'utiliser une source à potentiel constant pour régulariser la fréquence.

V. — EXAMEN COMPARATIF DES DIFFERENTS MODES D'ENTRETIEN DES PENDULES

» Dans les ouvrages concernant l'horlogerie électrique, on trouve des affirmations telles que celle-ci : « La constance de l'intensité du courant et de l'action électromagnétique qu'il produit sont pratiquement irréalisables » ⁽¹⁾ ; « La constance de l'action électromagnétique serait peut-être même insuffisante pour jouer le rôle d'un bon échappement de Graham » ⁽¹⁾ ; « Les ratés

⁽¹⁾ Voir ANDRADE. *Chronométrie*, 1908, page 342 (Encyclopédie scientifique).

dans un contact d'horloge sont absolument inévitables » ⁽¹⁾ ; « Le remontage des horloges ordinaires est de beaucoup la manière la plus pratique d'utiliser l'électricité ». ⁽²⁾

» Ces opinions sont tout à fait justifiées si l'on se base sur les mécomptes éprouvés dans l'emploi de nombreux systèmes paraissant correctement établis à première vue. Mais une étude plus approfondie de ces systèmes montre que les mauvais résultats obtenus sont toujours la conséquence de grossières erreurs de technique, particulièrement en ce qui concerne l'établissement des organes électriques. Il convient donc de ne pas condamner à priori tous les systèmes électriques, mais bien seulement ceux qui sont imparfaits.

» Une des plus sérieuses difficultés que l'on rencontre dans l'établissement des horloges électriques est la réalisation de contacts fonctionnant avec une très faible dépense d'énergie et ne se détériorant pas. Or, si l'on examine d'un peu près certains systèmes, on se rend compte que les interrupteurs sont très mal établis. De plus, les organes électriques moteurs ont presque toujours un rendement électrique déplorable, ce qui entraîne l'usure rapide de la pile en même temps que de grandes variations de la tension aux bornes. De là l'origine de l'opinion émise par la plupart des auteurs, qu'une action électrique est forcément irrégulière et que les contacts électriques sont toujours des organes délicats et capricieux sur le bon fonctionnement desquels on ne saurait compter.

» Parmi les causes de détérioration prématurée des piles et des contacts, j'indiquerai principalement l'emploi défectueux d'électroaimants ordinaires comme dispositifs électromoteurs.

» Les systèmes moteurs dans lesquels on utilise un circuit magnétique uniquement composé de fer doux et se déformant lorsqu'on établit un courant intermittent dans les bobines excitatrices ont un rendement extrêmement mauvais, surtout lorsqu'il s'agit de produire de faibles forces.

» Considérons, par exemple, un électroaimant. Lorsqu'on établit le courant, l'énergie électrique fournie se transforme non seulement en travail extérieur et en chaleur, mais encore en une va-

⁽¹⁾ BOUASSE. *Cours de Physique*, 1920, t. II; Pendule spiral, Diapason, page 209.

⁽²⁾ BOUASSE. *Cours de Physique*, 1920, tome II ; Pendule spiral, Diapason, page 186.

riation de l'énergie potentielle qui ne correspond à aucun effet utile. Au contraire, celle-ci donne lieu, lors de la rupture du circuit, à une étincelle qui détériore rapidement le contact électrique.

» On a pu, cependant, atténuer les effets de l'étincelle en shuntant le contact par des résistances sans self-induction ou des condensateurs ; mais les dispositifs à adjoindre sont toujours compliqués, délicats et coûteux ; leur efficacité, en pratique, laisse souvent à désirer.

» D'autre part, dans les électroaimants destinés à produire de très faibles forces, les pertes par effet Joule sont toujours relativement très élevées.

» On se propose, en effet, d'obtenir une certaine attraction pro-

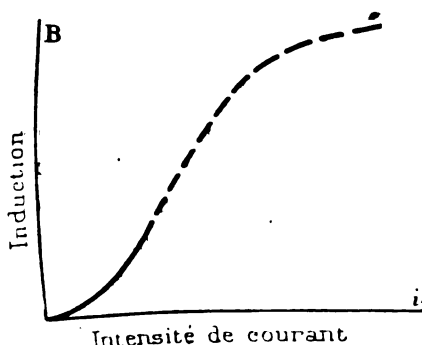


Fig. 16. — Induction du fer doux en fraction du courant magnétisant.

portionnelle au carré de l'aimantation. Or, si le noyau n'est pas aimanté, la forme de la courbe d'aimantation du fer doux (fig. 16) nous apprend qu'un faible courant produit une très petite variation d'aimantation. Il faudra donc une intensité relativement élevée pour produire une certaine aimantation en partant de la valeur 0.

» D'autre part, dans les petits appareils, il est difficile d'établir de bons circuits magnétiques. Il faut employer des entrefers relativement grands par suite des nécessités de fabrication et pour obtenir une certaine sûreté de fonctionnement. Pour toutes ces raisons, le rendement électrique est faible. Les piles s'usent très rapidement et donnent lieu à de multiples ennuis, beaucoup plus gênants que le remontage d'un ressort ; la consommation étant

élevée et la résistance électrique des bobines étant faible, il faut faire usage de piles de grandes dimensions, très encombrantes. Les variations de résistance du contact électrique ont une influence perturbatrice considérable sur la valeur des attractions électromagnétiques et les résultats obtenus au point de vue chronométrique sont déplorable.

» On a cru pouvoir supprimer l'influence des irrégularités du courant en le chargeant uniquement de préparer le pendule à recevoir l'impulsion d'un ressort ou d'un poids. D'innombrables systèmes, très ingénieux, sont basés sur ce dispositif général, qui est, le plus souvent, considéré comme le meilleur. Mais un examen plus approfondi des conditions de fonctionnement montre que le résultat cherché n'est pas atteint et que ces systèmes ne peuvent permettre la réalisation d'horloges présentant suffisamment de simplicité et de robustesse pour entrer dans l'usage courant.

» Dans ces systèmes, en effet, le dispositif électromoteur armant le poids ou le ressort, ainsi que le déclenchement de l'impulsion sont obligatoirement commandés par un contact manœuvré par le pendule. Or, il est facile de voir que les moyens simples qui permettent d'obtenir ces fonctions conduisent à placer le contact dans des conditions telles qu'il est impossible d'espérer un fonctionnement acceptable. En effet, pour actionner avec sûreté le dispositif électromoteur, lequel est généralement un électro-aimant, il faut augmenter l'intensité et la durée du contact strictement indispensables. Cette durée est même parfois considérablement accrue dans certains dispositifs lorsque le courant doit maintenir l'armature pendant une partie de la course du pendule. Dans ces conditions, le rendement devient extrêmement faible. Indépendamment des raisons déjà exposées pour lesquelles le contact se détériore, il faut considérer que les pressions de contact sont toujours extrêmement faibles et que l'on ne peut faire usage de contacts frottants, la moindre interruption risquant d'amener un retour intempestif de l'armature, dont l'inertie est toujours très faible. Le contact, par suite, fonctionne sans aucune sûreté.

» De plus, il ne faudrait pas croire que l'impulsion fût absolument indépendante de l'état de ce contact. L'énergie communiquée au pendule à chaque impulsion ne dépend pas seulement de

la force constante produite par le poids moteur, mais encore du chemin parcouru par cette force, lequel peut dépendre des conditions dans lesquelles se produit le déclenchement électrique du commencement ou de la fin de l'action du poids. Or, pour de faibles pressions de contact, et surtout lorsque les fermetures et ruptures du circuit ne sont pas très brusques, on ne peut obtenir des déclenchements électriques en des points absolument invariables.

» Les impulsions motrices sont donc influencées par l'état du contact et l'effet perturbateur de leurs variations est particulièrement important pour le mode d'entretien étudié, parce qu'elles amènent des variations d'amplitude relativement considérables (fig. 17) et que les conditions pour obtenir un parfait isochronisme ne peuvent généralement pas être observées.

» Les remarques précédentes concernant la détérioration du contact et l'usure rapide de la source s'appliquent à toutes les hor-

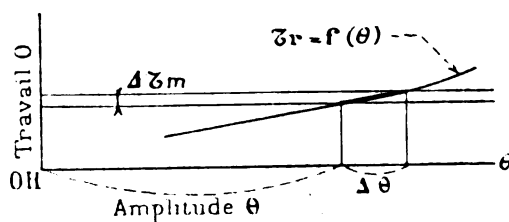


Fig. 17. — Graphique montrant l'influence d'une petite variation de l'impulsion motrice sur l'amplitude d'un pendule à entretien électrique.

loges fonctionnant à l'aide d'électroaimants devant fournir un travail supérieur à un minimum donné.

» On peut améliorer le rendement électrique en ne fermant le circuit que pendant le temps minimum nécessaire pour produire le travail correspondant aux pertes mécaniques.

» Lorsqu'on fait usage d'électroaimants, il est malgré tout indispensable d'atténuer l'influence des irrégularités dans les impulsions motrices. On y est parvenu en réalisant des échappements électromécaniques spéciaux dans lesquels l'entretien du mouvement ne se produit que lorsque le pendule a suffisamment perdu de sa force vive. L'ingénieux contact de Foucault a permis, notamment, d'obtenir ce résultat. Mais, quel que soit le système employé, il est évidemment indispensable que les organes ne se dérèglent pas à la longue. Ceux-ci doivent donc satis-

faire aux conditions suivantes : 1° il faut que les résistances passives soient très petites et que le rendement électrique soit très élevé, afin que l'usure de la pile soit très faible ; 2° il faut que l'intensité manœuvrée par le contact soit aussi très faible et qu'il ne se produise pas d'étincelle de rupture.

» On voit que le rendement électrique joue un rôle essentiel en électrohorlogerie et que la valeur d'un système est entièrement subordonnée à ce facteur.

» C'est précisément pour cette raison que le mode d'entretien Féry, par impulsions électromagnétiques décroissant avec la vitesse, peut être considéré comme très supérieur aux autres.

» La pratique a montré qu'avec des appareils établis comme l'indique schématiquement la figure 11, on peut réduire l'intensité au contact à moins de un demi-millampère. La consommation annuelle peut être rendue inférieure à 1 watt-heure, ce qui permet d'alimenter l'horloge au moyen d'une petite pile dont la durée peut atteindre plusieurs années, sans nécessiter d'intervention.

» Remarquons, d'autre part, qu'avec ce système on arrive à atténuer considérablement l'étincelle de rupture sans introduire de complications. En effet, nous avons vu que la bobine est le siège d'une force contre-électromotrice d'induction approximativement égale à $\frac{n l'}{a} (\Phi_2 - \Phi_1)$. La différence de potentiel entre les pièces formant interrupteur est, à l'instant de la rupture, $u = \frac{n l'}{a} (\Phi_2 - \Phi_1)$. Cette différence est très faible dans une horloge bien établie. D'ailleurs, à l'instant de la rupture, le flux Φ traversant la bobine étant uniquement dû à l'aimant (le flux produit par le courant étant négligeable devant Φ), il n'y a pas de variation de l'énergie potentielle. Le phénomène est donc essentiellement différent de celui qui se produit dans le cas d'un circuit magnétique de fer doux excité par une bobine.

» Bien que la consommation soit très réduite, le mode d'entretien permet de réaliser des horloges très robustes continuant à fonctionner malgré les petits accroissements des résistances passives. L'augmentation de ces résistances amène, en effet, une réduction de l'amplitude et, par suite, une diminution de la force contre-électromotrice induite dans la bobine. Le courant absorbé est plus

intense, de sorte qu'automatiquement les impulsions motrices deviennent plus fortes, ce qui permet de vaincre les résistances anormales.

» Au point de vue de la réalisation mécanique de l'horloge, on remarquera que l'on peut utiliser le mouvement du pendule pour actionner directement un compteur chronométrique.

» Nous verrons que ces compteurs peuvent être établis avec beaucoup plus de facilités que les mécanismes des horloges ordinaires.

VI. — DESCRIPTION DE QUELQUES HORLOGES

» A. PENDULES ENTRETENUS PAR IMPULSIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES DIRECTES. — De très nombreux dispositifs ont été proposés pour réaliser le mode d'entretien représenté schématiquement sur la figure 12. Je dirai quelques mots des principales solutions qui ont été envisagées et, pour éviter des redites, j'étudierai successivement : 1° le dispositif électromagnétique moteur ; 2° le dispositif de contact ; 3° le mécanisme de commande des aiguilles ; 4° les moyens prévus pour régulariser la fréquence des oscillations.

» 1° *Dispositif électromagnétique moteur.* — Pour obtenir les impulsions motrices, différents dispositifs électromagnétiques moteurs ont été utilisés. Ces dispositifs peuvent être répartis en trois classes principales :

» a) Dispositifs dans lesquels le courant produit la déformation d'un circuit magnétique uniquement composé de pièces de fer doux ;

» b) Dispositifs dans lesquels le courant produit le déplacement de pièces de fer par rapport à un aimant permanent ;

» c) Dispositifs dans lesquels un circuit électrique sans fer se déplace par rapport au champ d'un aimant permanent.

» Nous avons vu que les systèmes de la classe a) présentaient de sérieux inconvénients. Leur rendement est mauvais et le contact se détériore rapidement si l'on ne prend pas de précautions particulières (shunts, condensateurs). De plus, l'aimantation des pièces de fer doux ne s'annule pas complètement et il subsiste une attraction magnétique permanente, qui donne lieu à un couple s'ajoutant à celui de la pesanteur et influant sur le

pendule. Par suite, des perturbations dans la marche peuvent se produire du fait des variations du magnétisme rémanent. On trouve pourtant de tels dispositifs moteurs dans de nombreux brevets récents.

» L'utilisation de dispositifs à fer doux mobile et à aimant permanent permettra quelquefois d'améliorer le rendement et de supprimer les étincelles au contact. Mais ces systèmes présentent les inconvénients suivants : le couple dû à l'attraction magnétique prend une grande importance, si bien que le couple résultant rappelant le balancier vers la position d'équilibre, n'est généralement pas proportionnel à l'angle. Dans ces conditions, les oscillations ne sont pas isochrones et, de plus, toute modification dans l'aimantation se traduit directement par une variation importante de la période. D'autre part, le mouvement des pièces de fer dans le champ magnétique entraîne des pertes par hystérésis et courants de Foucault relativement élevées vis-à-vis des causes d'amortissement ordinaires, ces dernières étant toujours extrêmement faibles.

» Par suite, on donne généralement la préférence aux systèmes utilisant le mouvement d'un circuit électrique sans fer par rapport à un champ magnétique. Dans ce cas, l'aimant n'intervient que pour donner lieu à l'impulsion lorsque le contact électrique est établi. Le pendule oscille ensuite librement sans être soumis à une attraction magnétique.

» Les impulsions électromagnétiques sont souvent obtenues au moyen d'aimants plongeurs solidaires du pendule et de bobines fixes (ou vice versa). Je me bornerai à citer comme exemples de telles dispositions les horloges faisant l'objet des brevets suivants :

» Ch. Féry, brevet français n° 313 144 de 1901 (fig. 18) ; Holden, brevet anglais n° 14 873, de 1909 (fig. 19) ; Bardon, brevet français n° 479 370 de 1915 (fig. 20) ; Bentley, brevet anglais n° 8 461 de 1913 (fig. 21) ; Brienne et Renard, brevet français n° 4 124, 1921.

» Certains inventeurs préfèrent utiliser un aimant se déplaçant devant la bobine sans pénétrer à l'intérieur. Dans ce cas, le déplacement s'effectue parallèlement au plan des spires. Cette disposition est exposée dans le brevet français Verain et Mees n° 463 042, septembre 1913 (fig. 22) ; le brevet français Ch. Féry

n° 455 152 de février 1913 concerne également un système électromoteur comportant un aimant mobile dont le pôle se déplace devant une bobine avec ou sans fer. (fig. 23).

» Le même dispositif général se retrouve dans les brevets suivants : Bardon, brevet français n° 481 404, 1916 ; Holden, addition n° 21 616, 1919 (fig. 24) ; Pons, brevet français n° 501 215.

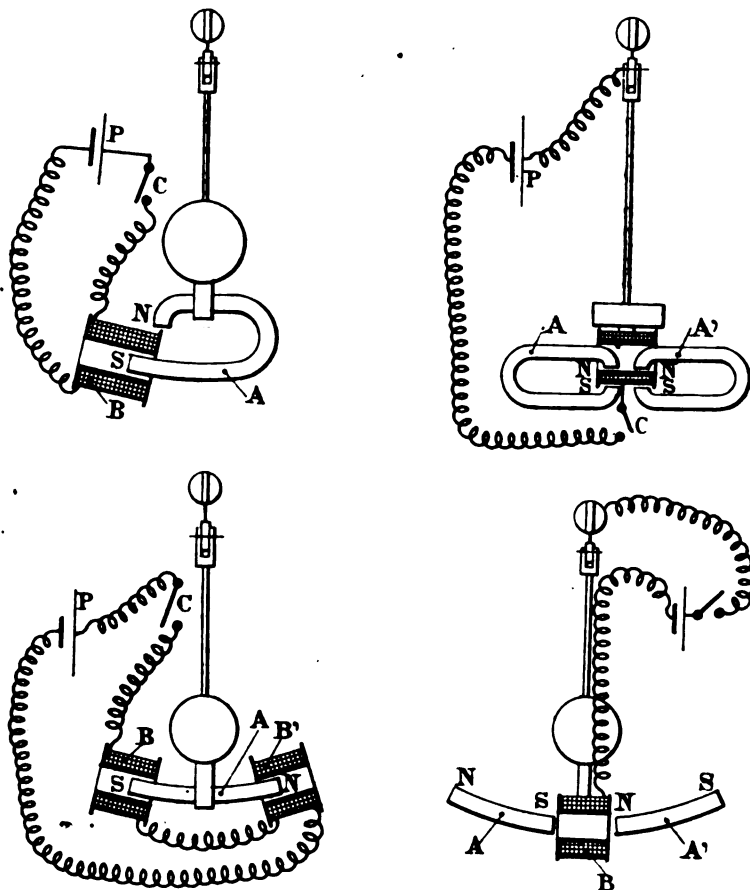


Fig. 18, 19, 20 et 21. — Exemples de pendules à aimants plongeurs et bobines; Féry, Holden, Bardon et Bentleyat.

1919 ; Poncet et Pons, brevet français n° 501 713, 1919 (fig. 25).

» Dans ce dernier brevet (fig. 25), les inventeurs ont adopté une bobine en forme de galette d'assez grand diamètre, se déplaçant entre deux aimants en fer à cheval très rapprochés. (1) Ils ont ainsi réduit l'entrefer à une faible valeur dans le but

(1) *Bulletin de la Société des anciens Elèves de Cluses*, avril 1921.

d'augmenter la variation du flux embrassé par les spires et d'améliorer le rendement.

» Dans l'horloge faisant l'objet du brevet français Moulin, Favre-Bulle n° 510 234, 1919 (fig. 27), l'aimant employé est un barreau courbe en forme d'arc de cercle dont l'aimantation permanente est telle que les deux extrémités sont de la polarité sud,

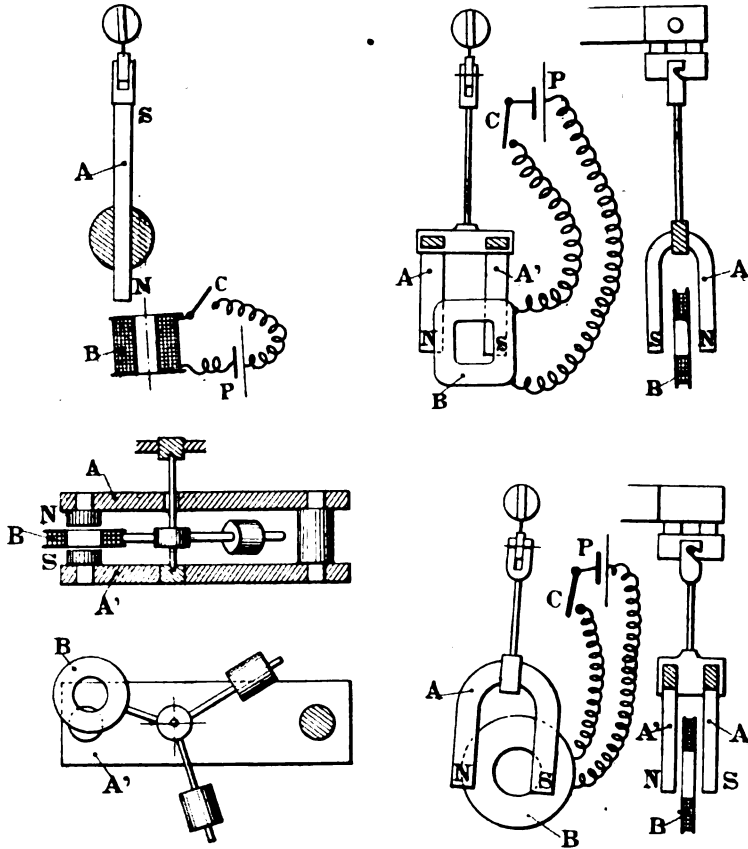


Fig. 22 et 23, 24 et 25. — Exemples de pendules armés d'aimants qui se déplacent parallèlement au plan des spires de bobines : Verain et Moes, Féry, Holden, Poncet et Pons.

tandis que la partie moyenne est de la polarité nord. Le mode d'aimantation permet d'obtenir une excellente utilisation de la matière, car les lignes de force ont la forme indiquée sur la figure 27 et l'on voit que la variation de flux par rapport au déplacement est plus importante que dans la disposition représentée en figure 14.

» La courbe $\varphi = f(x)$ est très inclinée sur l'horizontale dans la

région utile et elle n'est pas sensiblement modifiée lorsqu'on augmente le diamètre des spires. Dans ces conditions, il est possible d'augmenter le jeu entre le trou de la bobine et l'aimant tout en maintenant une valeur satisfaisante pour le rendement. Cette propriété présente un gros intérêt au point de vue pratique, car, lorsque le jeu entre la bobine et l'aimant est faible, la pose de l'horloge est délicate, le moindre défaut d'aplomb risquant de provoquer un frottement entraînant l'arrêt du pendule.

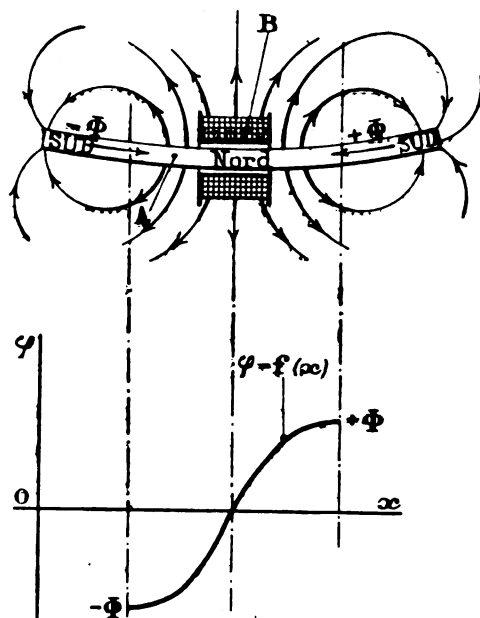


Fig. 26 et 27. — Dispositif électromagnétique moteur de Moulin et Favre-Bulle avec la courbe de variation du flux.

» Je terminerai l'examen des dispositifs électromagnétiques moteurs en signalant que l'on a également proposé l'utilisation d'un cadre oscillant dans un champ magnétique comme dans les galvanomètres. Une telle disposition fait l'objet des brevets suivants : Lepaute, brevet français n° 367 636, 1906 ; Garnier, brevet français n° 461 183, 1913.

» 2° *Contact électrique.* — Cet organe doit fermer le circuit électrique lorsque le pendule passe par la verticale en se déplaçant dans un sens déterminé. Il joue un rôle très important, car c'est de lui que dépend la régularité des impulsions motrices assurant l'entretien des oscillations du pendule.

» Ce contact électrique est très difficile à établir, car il doit satisfaire à de très nombreuses conditions. J'indiquerai ci-après les principales pour montrer la complexité du problème.

» 1° Le parcours du pendule pendant lequel le contact est fermé doit être constant.

» 2° La pression de contact doit être suffisamment élevée pour que la résistance électrique du contact soit faible. Il ne doit pas y avoir de vibrations des pièces de contact susceptibles d'amener des interruptions du circuit et de modifier ainsi les valeurs des émissions de courant.

» 3° Les pièces venant en contact doivent frotter légèrement l'une sur l'autre et leur déplacement doit produire un balayage des poussières.

» 4° L'énergie mécanique dépensée pour actionner le dispositif de contact doit être extrêmement faible. Elle ne doit pas entraîner de perturbations dans la fréquence des oscillations.

» 5° Si le pendule s'arrête pour une raison quelconque, il est désirable que le circuit soit coupé.

» 6° Si l'on réduit l'amplitude des oscillations du pendule, il est désirable que les fermetures successives du circuit continuent à s'effectuer de façon que le pendule reprenne sa marche de lui-même.

» 7° Le dispositif de contact doit être robuste, indéréglable, facile à construire et à vérifier.

» 8° Il ne doit pas faire un bruit irrégulier désagréable à entendre.

» 9° Il doit pouvoir fonctionner pendant très longtemps sans usure nuisible et sans nécessiter de nettoyage.

» Dans la plupart des horloges, le contact électrique est associé au dispositif de commande du mécanisme démultiplicateur actionnant les aiguilles.

» Ce dispositif de commande est généralement constitué par un cliquet A, articulé sur le pendule, faisant tourner une roue à rochets B, comme l'indique la figure 28. Chaque fois que le pendule se déplace dans le sens f, la roue B tourne d'un angle correspondant à 1 dent.

» Un ressort C, appelé « sautoir », est muni d'une pièce d,

tendant à se placer dans l'un des creux du rochet. Lorsque le rochet est actionné, le sautoir se soulève et retombe dans le

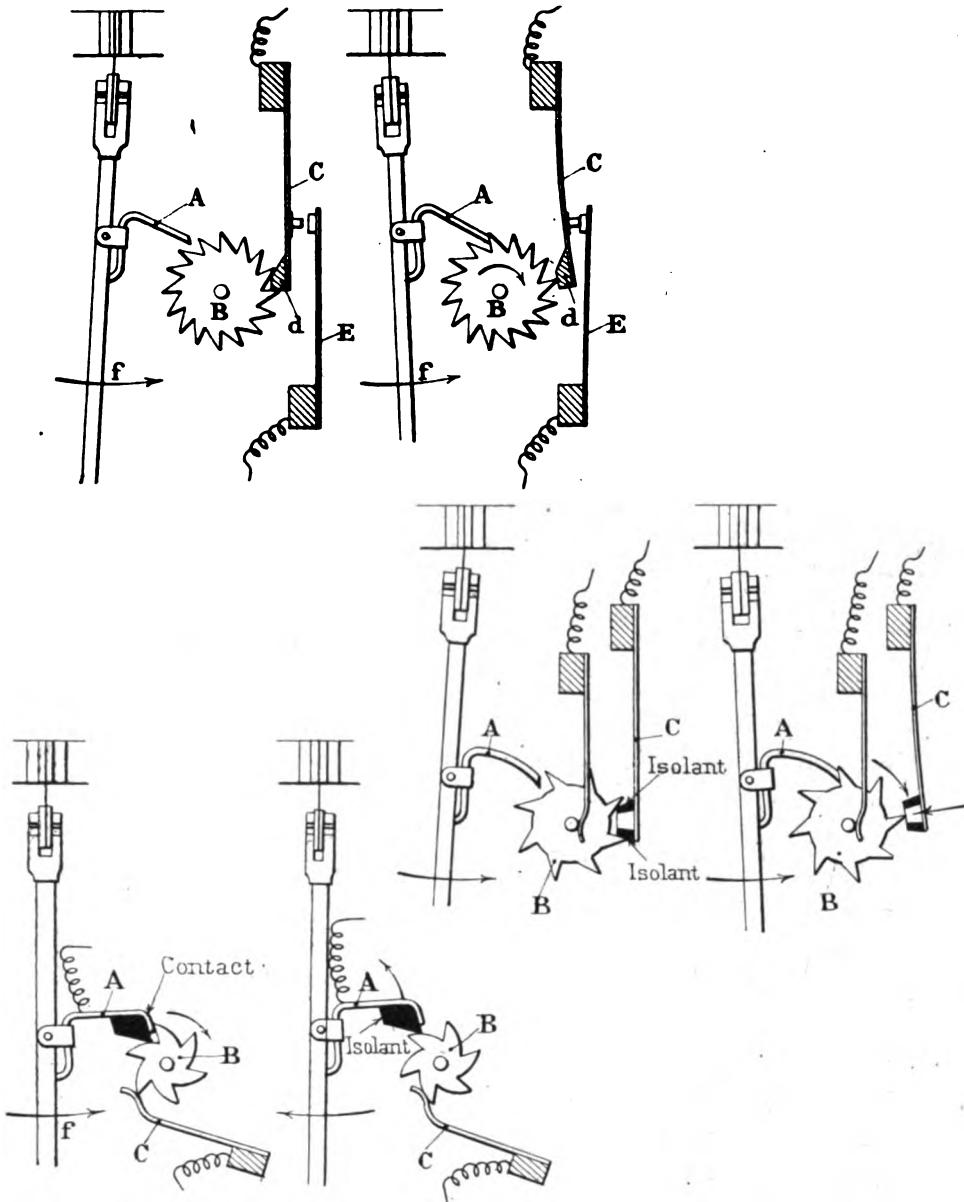


Fig. 28, 29 et 30. — Différents dispositifs montrant le contact électrique associé à la commande du mécanisme démultiplicateur actionnant les aiguilles : Féry et Moulin-Fabre Bulle.

creux suivant. Il s'oppose ensuite au retour en arrière du rochet B.

» Le contact électrique peut être pris entre le « sautoir » et un ressort très flexible E, disposé à une faible distance, de façon à ce qu'il soit soulevé lorsque le rochet est conduit par le cliquet moteur.

» Cette disposition est due à M. Féry et elle est décrite dans son brevet français n° 313 144 de 1901. On remarquera que l'on peut construire le dispositif pour que l'impulsion se fasse au voisinage immédiat de la verticale et que le cliquet quitte le rochet dans les fins de course (échappement libre).

» Ces conditions sont favorables à la régularité de la marche.

» Ce contact est employé dans les horloges électriques faisant l'objet des brevets français Verain et Mess, n° 463 072, 1913 ; Bardon, n° 479 376, 1915 ; Poncet et Pons, n° 501 713, 1919 ; etc...

» M. Féry a récemment perfectionné cette disposition en faisant entrer la roue à rochets dans le circuit et en établissant le contact entre les dents du rochet et le sautoir muni de parties isolantes pour que le contact n'ait lieu que lorsque le rochet avance (Féry, brevet français n° 523 399, 1920).

» La disposition adoptée est représentée figure 29.

» M. Féry signale que, dans les horloges munies d'un contact du genre de la figure 28, les contacts se recouvrent d'une poudre noire constituée en grande partie par du métal très finement divisé. Cette poudre impalpable s'interpose entre les pièces métalliques amenant le contact et peut finir par constituer une véritable résistance microphonique produisant des perturbations dans la marche de l'horloge. La disposition de la figure 29 permet d'éviter que les particules de métal détaché et de l'oxyde formé ne s'accumulent sur le contact, car les dents de la roue d'échappement produisent sur ce dernier un balayage continu toujours dans le même sens.

» On peut également prendre le contact entre le cliquet moteur et le rochet. Cette disposition, schématisée sur la figure 30, a fait l'objet de l'addition Moulin, Favre-Bulle, n° 12 710, 1920. Une partie isolante permet d'éviter tout contact électrique au retour du pendule.

» Le contact électrique se produira tout aussi bien entre une pièce A, articulée sur le pendule, et une pièce fixe B venant la toucher chaque fois que le pendule passe par la verticale dans les deux sens. Il faut alors un dispositif accessoire pour que le

sens du courant soit inversé à chaque contact ou que le passage du courant soit supprimé pendant les courses retour du pendule.

» A cet effet, on peut profiter de la résistance de l'air sur la pièce mobile ou de son inertie pour la soulever et éviter le contact lorsqu'elle se déplace dans un sens (contact Lemoine).

» On peut aussi munir la pièce A ou la pièce B de garnitures isolantes, de façon que le circuit électrique ne soit fermé que pendant les courses du pendule dans un seul sens. De nombreux dispositifs permettent d'obtenir ce résultat. Je citerai ceux qui font l'objet des brevets suivants : Holden, brevet n° 417 221, 1910 (voir fig. 31) ; Lepaute, brevet n° 367 636, 1906 ; Kutnow, brevet n° 367 856, 1906.

» On évitera l'emploi de garnitures isolantes grâce à certaines dispositions capables de réduire considérablement la durée du contact entre A et B pendant les courses « retour » du pendule. Le brevet Holden n° 494 398, 1918, concerne un tel dispositif.

Sur la figure 32 est représenté un contact facile à réaliser dans les laboratoires (BOUASSE, *Magnétisme et électricité*, tome II, p. 201).

» Dans le brevet français n° 379 132, 1907, M. Féry a décrit un contact permettant de fermer le circuit pendant chaque demi-oscillation dans un certain sens f . Le contact se fait entre une palette légère A et une pièce solidaire du pendule. La résistance de l'air est telle que la palette A est écartée de B pendant les courses en sens inverse de f ; M. Féry indique que les pendules munies d'un tel interrupteur se mettent en marche d'elles-mêmes.

» On peut rapprocher de cet interrupteur celui qui fait l'objet du brevet américain Warren, n° 1 089 886, 1914. Le contact est fourni par une boule conductrice (par exemple une goutte de mercure) contenue dans un tube isolant, solidaire du pendule. Lorsque ce dernier oscille, la boule prend également un mouvement de va-et-vient dans le tube avec un certain déphasage par rapport au mouvement du pendule. Elle assure la fermeture périodique du circuit d'entretien et les différents facteurs influant sur son mouvement ont été réglés pour obtenir une durée de contact et un déphasage variables avec l'amplitude, de telle sorte que l'énergie reçue par le pendule décroisse très vite lorsque l'amplitude augmente au delà d'une certaine valeur.

» Je décrirai, comme autre exemple d'interrupteur, celui qui fait

l'objet du brevet Favre-Bulle n° 518 465, 1920. Le contact électrique se fait entre une cheville A, solidaire du pendule, et une pièce B ayant la forme des fourchettes des échappements à ancre de montre (fig. 33). La cheville s'engage dans l'encoche de la fourchette et la déplace alternativement dans les deux sens. L'une des branches de la fourche est conductrice, l'autre des branches

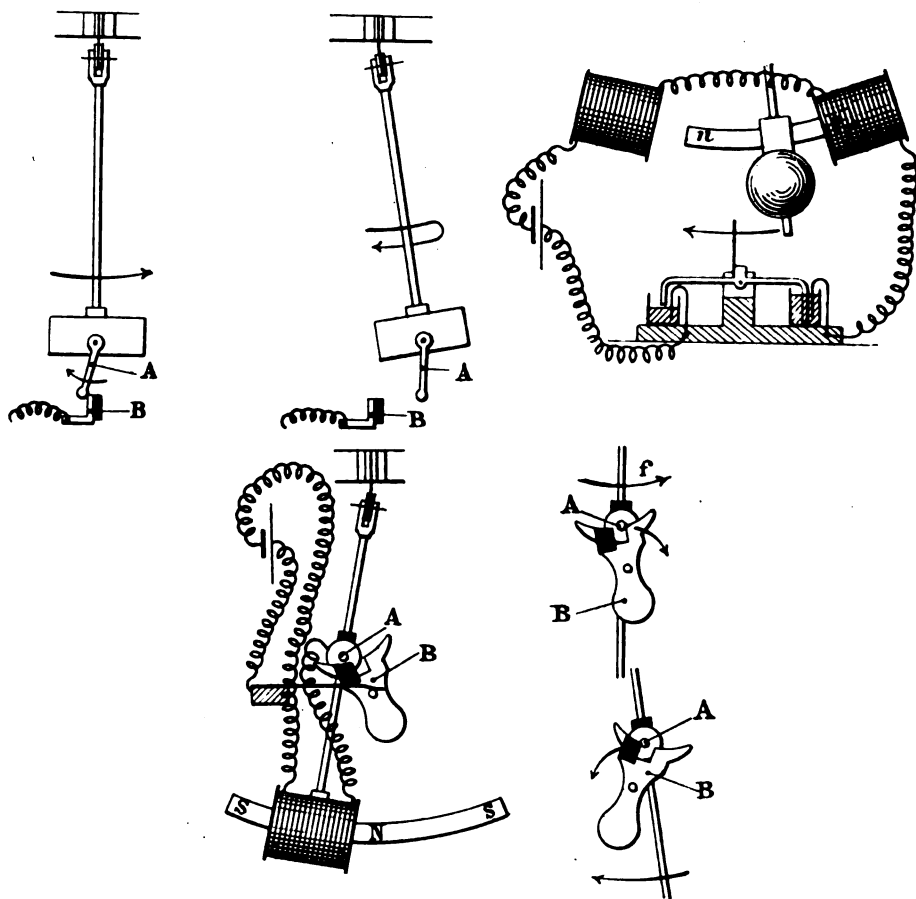


Fig. 31, 32 et 33. — Autres formes d'adaptation du contact électrique au pendule : Holden, Féry, Favre-Bulle.

porte une garniture en matière isolante. De la sorte, le contact électrique n'a lieu que dans les courses du pendule dans le sens f. Aux fins de courses, le contact est rompu, car la cheville se dégage de la fourchette et le pendule oscille alors librement.

» On remarquera que le mode d'action de la cheville permet d'obtenir un excellent nettoyage des surfaces en contact. Les poussières sont parfaitement éliminées.

» La mise en action de tous les interrupteurs précédents entraîne des résistances passives que l'on cherche à réduire le plus possible. Mais on est arrêté dans cette voie par la nécessité de conserver une pression de contact suffisante pour que la résistance électrique du contact reste faible.

» A l'aide de ressorts fixés sur un support rigide et soulevés à chaque oscillation par le pendule, on peut obtenir des pressions relativement élevées sans accroître les pertes mécaniques, car le ressort restitue, en se détendant, l'énergie qu'il absorbe en se soulevant. De tels contacts sont donc très intéressants et l'on a cherché à les utiliser pour l'entretien des pendules. Toutefois, on se rend compte qu'ils ne peuvent suffire pour commander directement le circuit électrique, car le couple moteur obtenu serait alors une fonction uniforme de l'angle du pendule avec la verticale et l'énergie reçue par celui-ci dans un cycle serait nulle. Il est possible cependant, de tourner la difficulté à l'aide de relais ou d'un balancier auxiliaire commandé par le premier avec un certain déphasage. Je me bornerai de citer comme exemples de tels modes d'entretien les systèmes faisant l'objet des brevets : Vigreux-Brillé, n° 384 920 et 373 099, 1906, et Féry, n° 385 188, 1907.

» Tous les systèmes de contact, quelles que soient leurs qualités au point de vue mécanique, ne donneront des résultats pratiques satisfaisants que si le système électromagnétique moteur est convenablement établi. Il est absolument indispensable que l'intensité coupée soit très faible. On doit considérer, en effet, qu'il se produit un très grand nombre de ruptures (86 400 par jour pour les balanciers à seconde) et que les horloges doivent pouvoir fonctionner pendant de nombreuses années sans nécessiter d'entretien.

» Les propriétés des systèmes électromagnétiques moteurs permettent d'ailleurs de placer le contact dans des conditions particulièrement favorables, en profitant des variations de la vitesse de la bobine et de la possibilité de modifier la forme de la courbe $\varphi = f(x)$ (fig. 27), afin que $\frac{d\varphi}{dt}$ varie suivant une loi déterminée.

» On conçoit que, dans le cas d'un contact un peu prolongé, on puisse établir l'aimant et choisir les points d'ouverture et de fermeture du circuit de façon que la force contre-électromotrice

d'induction $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{dx} \times \frac{dx}{dt}$ varie pendant la durée du contact et soit maximum à l'instant de la rupture.

» On peut même régler les valeurs entrant en jeu pour que, à la fin du contact, cette force contre-électromotrice équilibre exactement la force électromotrice de la pile. Il est évident que l'on se trouvera placé dans les meilleures conditions en coupant le circuit lorsque le courant électrique sera déjà nul (fig. 34). Cette condition étant réalisée, il n'y a pas d'étincelle de rupture. On peut ainsi supprimer radicalement toute cause de détérioration provenant du courant électrique.

» 3° *Mécanisme de commande des aiguilles.* — Cet organe n'est pas autre chose qu'un compteur du nombre des oscillations du pendule. Ce dernier fait, à chaque oscillation, avancer d'un angle constant le premier mobile d'un mécanisme démultiplicateur actionnant les aiguilles.

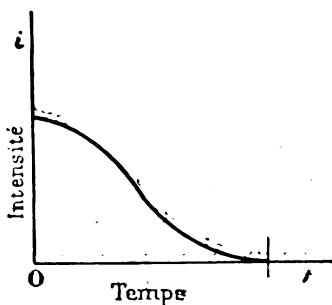


Fig. 34. — Diminution du courant passant par le contact jusqu'à son annulation par la force contre-électromotrice d'induction.

» La démultiplication peut évidemment être obtenue par un train d'engrenages ordinaires, mais tous les systèmes de compteurs sont susceptibles d'être utilisés, à la seule condition d'exiger pour le fonctionnement une force très faible et aussi régulière que possible. On réalise, en particulier, la démultiplication par engrenages discontinus ou par encliquetages; ce qui permet d'avoir entre deux mobiles des rapports de démultiplication plus élevés qu'avec les engrenages ordinaires (voir notamment brevet américain Kling Muller, n° 239 507, 1917).

» On peut également recourir à l'engrenage par vis sans fin et roue hélicoïdale, qui permet aussi d'obtenir de grands rapports de démultiplication. Je décrirai, à titre d'exemple, le

mécanisme d'une grande simplicité faisant l'objet du brevet français Favre-Bulle, n° 518 465, 1920.

» Ce mécanisme, représenté figure 35, comporte essentiellement une roue à rochets A, solidaire d'une vis sans fin B à un filet engrenant avec une roue C de 60 dents, solidaire de l'axe des aiguilles.

» Le pendule actionne un cliquet qui fait avancer la roue A de une dent à chaque course du pendule. Le nombre de dents est tel que le rochet fait un tour complet par minute. La roue C exécute

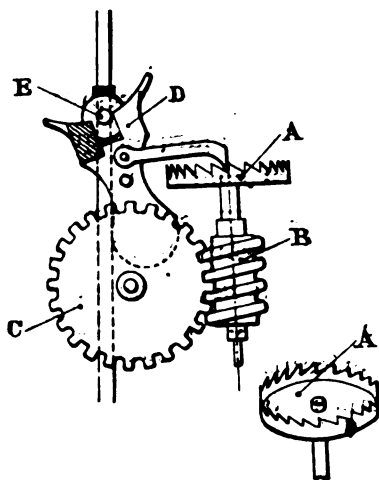


Fig. 35. — Démultiplication par engrenages avec vis sans fin et roue hélicoïdale de Favre-Bulle.

donc un tour par heure. Le cliquet est articulé sur la fourchette D (laquelle est également utilisée pour le contact électrique).

» Cette pièce tourne d'un angle constant lorsque le pendule passe au voisinage de la verticale. Ensuite, la cheville E se dégage de la fourchette équilibrée D, si bien que celle-ci reste immobile aux extrémités de la course du pendule dans les deux sens. Il s'ensuit que l'amplitude des oscillations peut être réduite notablement sans que la course du cliquet et le fonctionnement du compteur soient modifiés.

» Cet avantage n'existe pas lorsque le cliquet est directement articulé sur le pendule et que le rochet possède un grand nombre de dents. Dans ce cas, en effet, la course du cliquet dépend de celle du pendule et il est indispensable que l'amplitude reste sensiblement constante pour que le cliquet se déplace de la quantité

convenable pour faire progresser le rochet d'au moins une dent et de moins de deux dents à la fois.

» 4° *Organes permettant de régulariser la fréquence des oscillations.* — Dans l'établissement des horloges électriques, on peut se conformer aux règles ordinairement observées pour la réalisation des instruments horaires mécaniques (pendule oscillant à une très faible amplitude, impulsions motrices très brèves, lorsque le pendule passe par la verticale). Toutefois, l'observation stricte de ces règles entraîne de sérieux inconvénients dans la réalisation des horloges destinées à l'usage courant. Celles-ci, en effet, doivent avant tout être très robustes et fonctionner malgré les petites imperfections de construction, l'épaississement des huiles, l'affaiblissement de la pile, les trépidations du support, etc...

» Or, il est essentiel de remarquer que, dans les horloges du type étudié, le pendule est chargé non seulement de régulariser le mouvement des aiguilles, mais encore de les actionner. Il faut par suite éviter que le travail absorbé par le mécanisme n'entraîne des irrégularités dans la fréquence des oscillations et, pour cela, il est désirable que la commande se fasse au voisinage de la verticale et que le mécanisme soit très bien construit de façon à opposer une résistance aussi faible et aussi constante que possible.

» D'autre part, l'influence perturbatrice des variations de cette résistance sera d'autant plus faible que l'énergie cinétique du pendule sera plus grande devant l'énergie mécanique absorbée.

» Pour un pendule d'une longueur et d'un poids donnés, il y aura donc intérêt à accroître la vitesse de la masse du pendule et, par suite, l'amplitude des oscillations. De la sorte, on évitera également les arrêts qui se produisent lorsque le pendule oscille très faiblement et que le support est soumis à des trépidations. Dans ce cas, en effet, le pendule perd de sa force vive par suite des vibrations du support et son énergie cinétique peut être insuffisante pour vaincre la résistance due à l'entraînement des aiguilles. D'ailleurs, pour certains systèmes d'horloges, l'arrêt peut être produit par une faible réduction de l'amplitude, lorsque le contact cesse de fonctionner quand le cliquet pousse le rochet de moins d'une dent.

» Au point de vue de la sûreté de fonctionnement, il est donc désirable que le pendule oscille avec une amplitude relativement

grande et que le bon fonctionnement du compteur soit assuré malgré une réduction importante de cette amplitude. Mais alors, si l'on ne prenait pas de précautions particulières, les oscillations cesseraient d'être isochrones. On sait, en effet, que l'isochronisme n'est obtenu que pour les faibles arcs et que la période est d'autant plus longue que l'amplitude est plus grande. Les retards totalisés pendant un jour correspondant aux amplitudes θ jusqu'à 10° sont indiqués sur la courbe, figure 36. Pour une amplitude de 10° par exemple, une variation dans les impulsions motrices ou retardatrices entraînant une réduction de l'amplitude de 1° ,

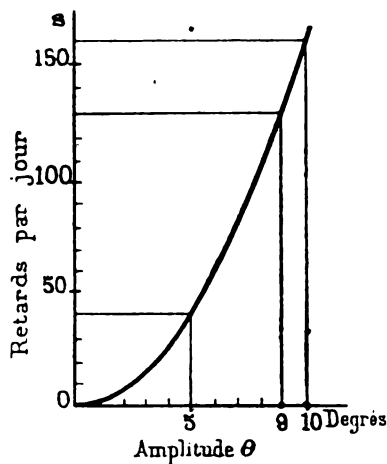


Fig. 36. — Courbe des retards journaliers en fonction de l'amplitude du pendule

amènerait une réduction de la période de $36/100\ 000$, soit de 30 secondes par jour, ce qui serait inacceptable. Fort heureusement, il existe différents moyens permettant d'obvier à ce grave inconvénient. Remarquons, d'ailleurs, que cette même difficulté s'est posée pour les horloges mécaniques, dont les pendules doivent également osciller à amplitude variable, par suite des modifications des frottements et de l'état de tension du ressort moteur. Dans ce cas, on a profité de ce que l'échappement modifiait en général la loi de variation de la période par rapport à l'amplitude ; l'on a pu établir des échappements permettant d'obtenir un isochronisme très approché pour le système complet (pendule-échappement) et cela, en s'écartant des conditions permettant d'assurer l'isochronisme du pendule seul.

» Les mêmes moyens sont applicables aux horloges électriques.

Considérons par exemple une horloge munie d'un contact du genre Féry représenté figure 28. Si le contact se produit à la verticale, l'entraînement du rochet se fait un peu en avant, ce qui produit un léger accroissement de la période. Cet effet est d'autant plus faible que l'amplitude des oscillations est plus grande. Par suite, lorsqu'on fonctionne à des amplitudes croissantes en faisant varier le courant d'alimentation, la période décroît, puis elle croît ensuite en raison du défaut d'isochronisme du pendule.

» La courbe représentative de la période T en fonction de l'amplitude θ est représentée sur la figure 37. On aura intérêt à adopter une amplitude de régime θ_r correspondant au minimum de T , de façon que la variation de T soit du second ordre par rapport à celle de θ .

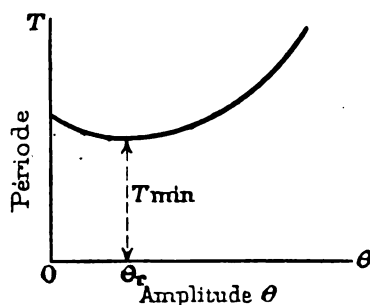


Fig. 37. — Courbe donnant la période T en fonction de l'amplitude du pendule.

» Dans l'horloge Moulin-Fèvre Bulle, les forces retardatrices et motrices se produisent dans le voisinage de la verticale et le pendule oscille librement comme dans les horloges mécaniques munies d'un échappement libre. Il s'en suit que la période est à peu près la même que si le pendule oscillait librement sans amortissement. L'équation du mouvement serait alors :

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + Pl \sin \theta = 0$$

» Pour que la période soit indépendante de θ_{max} , il faut que le couple de rappel soit de la forme $C \theta$. Or, $P l \sin \theta$ est approximativement égal à $P l \left(\theta - \frac{\theta^3}{6} \right)$. On a réalisé l'isochronisme pour des arcs quelconques en ajoutant au couple dû à la pesanteur un

couple supplémentaire, nul pour la position d'équilibre et croissant à peu près comme le cube de l'angle θ .

» Ce couple supplémentaire est obtenu au moyen du ressort à boudin R dont les extrémités sont articulées, d'une part, en un point fixe A situé sur la verticale passant par le point de suspension et en un point B du pendule (fig. 38).

» La composante tangentielle F varie en raison de l'augmentation de l'obliquité du ressort et de son allongement et l'on obtient pour le couple additionnel la progression désirable.

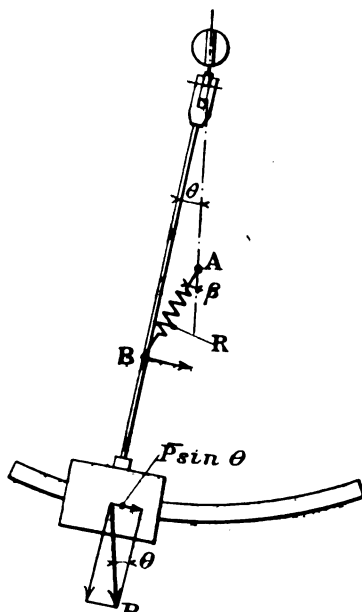


Fig. 38. — Entretien de l'isochronisme des oscillations au moyen d'un couple supplémentaire fourni par le ressort R.

» L'adjonction de ce ressort confère au pendule la propriété d'osciller à une fréquence constante malgré une réduction de la force électromotrice de la pile pouvant atteindre jusqu'à 50 pour 100.

» Comme une variation aussi importante de l'amplitude ne compromet pas le bon fonctionnement du compteur, ni du contact électrique, l'horloge peut être alimentée par une source dont la tension n'a pas besoin d'être constante. On peut utiliser notamment une pile du genre Leclanché, qui peut faire fonctionner l'horloge pendant de nombreuses années.

» A ce propos, j'attirerai votre attention sur l'intérêt que présenterait, en électro horlogerie, la réalisation de piles herméti-

ques ne s'usant qu'en raison de l'énergie fournie et ne nécessitant pas d'entretien. Les piles courantes de 1 litre peuvent fournir plus de 50 watts-heure. La consommation d'une horloge étant d'environ 1 watt-heure par an, la durée de fonctionnement au moyen d'une même pile pourrait atteindre une cinquantaine d'années ! Rien ne s'opposerait, théoriquement, à la réalisation de telles piles. Il suffirait que le liquide ne s'évaporât pas et que les produits utilisés ne s'altérassent pas à la longue. Diverses piles actuellement à l'étude semblent d'ailleurs répondre à ces desiderata et il est permis d'espérer que l'on disposera bientôt d'horloges indépendantes, offrant le merveilleux avantage de fonctionner presque indéfiniment sans remontage ni intervention d'aucune sorte, comme si le chimérique mouvement perpétuel était réalisé !

VII. — HORLOGES ELECTROMAGNETIQUES

A BALANCIER CIRCULAIRE

» Les systèmes d'entretien des pendules que nous venons d'examiner sont également applicables au balancier circulaire, auquel on doit obligatoirement recourir lorsque l'instrument horaire est mobile (chronomètre pour les navires et les véhicules, montres). Mais, dans ce cas, la réalisation pratique est beaucoup plus difficile et les modes d'entretien électrique entraînent des difficultés particulières.

» Dans le cas du balancier circulaire monté sur pivots, on est conduit à réduire considérablement le poids de l'équipage mobile pour diminuer les frottements et les effets des chocs qui risqueraient de briser les pivots. Le moment d'inertie étant faible, on augmente l'énergie cinétique du balancier en réduisant la période et en augmentant considérablement l'amplitude des oscillations.

» Par suite, le système électromagnétique doit permettre une rotation du balancier de 1 tour environ. Il est difficile dans ces conditions d'utiliser un système électromagnétique à aimant plongeur. On donne la préférence aux systèmes dans lesquels le pôle d'aimant se déplace devant la bobine, le déplacement étant parallèle au plan des spires.

» La nécessité de réduire considérablement le poids du ba-

lancier oblige, soit à diminuer le poids de l'aimant lorsque celui-ci est fixé sur le balancier, soit le poids de la bobine lorsque **c'est celle-ci qui est mobile**. Il est, par suite, beaucoup plus difficile d'obtenir un rendement électrique satisfaisant. De toutes façons, l'énergie cinétique est relativement faible et l'influence perturbatrice des frottements est plus grande que dans le cas des pendules.

» Enfin, la présence d'aimants au voisinage du spiral réglant entraîne également des difficultés.

» Je me bornerai à mentionner quelques brevets récents concernant des balanciers circulaires entretenus électriquement : horloge électrique à balancier circulaire Féry, n° 523 885, 1916 ; chronomètre électrique Ch. Pons, n° 501 215, 1919 ; pendulette Holden, addition n° 21 616, 1919 ; pendulette Cargill, n° 544 261, 1922.

VIII. — COMPARAISON ENTRE LES HORLOGES ELECTROMAGNETIQUES ET LES HORLOGES MECANIQUES

» L'horloge électromagnétique n'offre pas seulement l'avantage de pouvoir fonctionner pendant plusieurs années sans remontage ni entretien. Elle présente également, sur les anciens systèmes mécaniques, une grosse supériorité au point de vue de la simplicité et de la robustesse du mécanisme.

» Examinons, en effet, les conditions de fonctionnement d'une pendule mécanique. Un tel système, représenté schématiquement sur la figure 39, comporte obligatoirement un train d'engrenages de raison très élevée, destiné à multiplier considérablement le déplacement du poids ou du ressort moteur. Le couple transmis au dernier mobile du rouage est extrêmement faible. Il doit, cependant, être suffisant pour actionner l'échappement chargé de communiquer au balancier une succession d'impulsions motrices. Remarquons que l'on ne peut obtenir un fonctionnement convenable que si la force transmise à l'échappement est très régulière. Or, dans un tel système, les résistances mécaniques sujettes à variations importantes sont inévitables et ce n'est qu'en apportant des soins minutieux dans l'établissement des organes que l'on peut obtenir de bons résultats. Il se produit, en effet, des pertes importantes par suite des frottements entre les spires du

ressort et dans les engrenages, par suite aussi des chocs et du glissement des pointes des dents de la roue d'échappement sur les plans inclinés solidaires du balancier. Les moindres imperfections dans la construction des organes, ou seulement l'épaississement des huiles ou l'encrassement des pivots, entraînent l'arrêt du mécanisme. A ces causes d'arrêt s'ajoutent celles qui proviennent des ruptures fréquentes des ressorts moteurs et de certaines pièces extrêmement fragiles et délicates soumises à des pressions et à des chocs relativement considérables.

» On se rend compte que tous ces inconvénients peuvent être évités avec les modes d'entretien électriques. Si vous examinez,

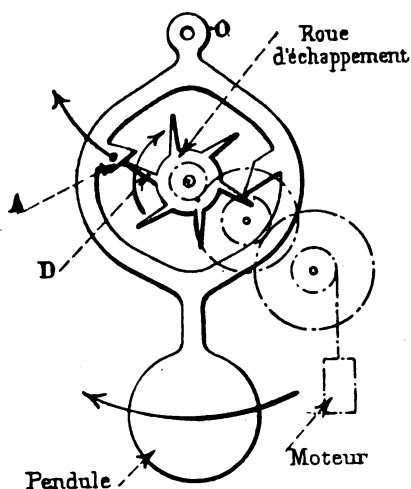


Fig. 39. — Schéma du fonctionnement d'un pendule mécanique ordinaire.

par exemple, l'horloge électrique que voici, établie par la Compagnie générale des Appareils horo-électriques, d'après les brevets Moulin-Favre Bulle dont je vous ai dit quelques mots, vous constaterez que le mécanisme de commande des aiguilles, réduit à un simple compteur du nombre des oscillations du pendule, est d'une très grande simplicité et ne comporte aucune pièce délicate. L'usure due au fonctionnement n'est pas appréciable, l'axe des aiguilles le plus chargé étant soumis à un effort inférieur à 10 grammes, alors que, dans les horloges mécaniques, les mobiles recevant la force du ressort sont soumises à des poussées plus de cent fois supérieures.

» Le transport et l'installation de l'horloge se font plus simplement que pour une pendule ordinaire, le balancier n'ayant pas

besoin d'être retiré et remis en place. Le fonctionnement reste assuré malgré une augmentation notable des frottements et malgré les trépidations du support. Ces causes perturbatrices ont, en effet, pour résultat de faire baisser l'amplitude, et, par suite, la force contre-électromotrice induite dans la bobine, ce qui entraîne automatiquement une augmentation du courant d'entretien et des impulsions motrices assurant la continuité du bon fonctionnement. La marche reste régulière grâce aux précautions prises pour assurer l'isochronisme des oscillations à toutes les amplitudes. La précision obtenue dans la mesure du temps est de l'ordre de 10^{-5} . Elle est bien meilleure qu'avec les systèmes courants.

» Le contact électrique fonctionne sans nécessiter d'entretien ; il a plutôt une tendance à s'améliorer par l'usage, grâce au glissement des pièces l'une sur l'autre et au nettoyage continu des poussières qui en résulte.

» Quant à la pile, elle peut débiter suffisamment d'énergie électrique pour faire marcher la pendule pendant plus de cinq années. Le seul entretien qu'elle nécessite consiste à compenser l'évaporation du liquide par une addition d'eau ; mais cette opération ne devient nécessaire qu'à de très longs intervalles de temps, tous les deux ans par exemple ; elle n'est donc pas comparable à la sujétion fastidieuse du remontage hebdomadaire des pendules à ressort moteur.

» On voit par cet exemple que toutes les difficultés du problème, réputé insoluble, de l'entretien électrique des horloges, ont été surmontées et qu'il existe maintenant des appareils industriels bien au point, qui marquent un progrès incontestable sur les anciens systèmes mécaniques.

IX. — APPLICATIONS

» L'importance des besoins en instruments horaires, dont la fabrication occupe en France plus de 15 000 ouvriers, permet d'envisager un développement intéressant de l'horlogerie électrique. Celle-ci peut permettre également d'améliorer les conditions d'établissement de différents appareils applicables par particulièrement à l'industrie électrique, notamment : les avertisseurs horaires destinés à déclancher, à des heures déterminées, des

signaux acoustiques ou **optiques** ; les **allumeurs-extincteurs horaires** pour l'éclairage public et privé ; les **appareils** pour le **contrôle des entrées et sorties** du personnel et du travail en série ; les **mécanismes horaires** des **enregistreurs divers** utilisés dans les **centrales** et dans les **usines** pour le **contrôle des opérations industrielles** ; les **mécanismes horaires** destinés à **commander les compteurs change-tarifs** permettant l'application d'une **tarification variable** suivant les heures de consommation.

» Il est à noter également que l'horloge électrique indépendante pourra contribuer à résoudre certains problèmes actuellement à l'étude concernant l'unification de l'heure en utilisant les réseaux d'énergie et de lumière ou la radiotélégraphie. Dans les systèmes envisagés, il est, en effet, indispensable de disposer d'un mécanisme horaire à fonctionnement indépendant sur lequel opère de temps en temps un dispositif de remise à l'heure mis en action par des signaux émis d'un poste central. Il est bien évident que, dans ces applications spéciales, l'emploi de mécanismes horaires électriques sera particulièrement avantageux. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. M. Lavet.

Les ampoules à rayons X et leur fabrication, par M. JOHANNÈS.

Le rayonnement X. — Décharge dans les gaz raréfiés. — Le faisceau cathodique. — Arrêt du faisceau cathodique. Production du rayonnement X. — Régulation de la longueur moyenne d'onde du rayonnement. — Description générale de l'ampoule. — Electrodes. — Régulateurs de pression. — Fabrication de l'enceinte étanche, fixation des électrodes. Obtention des joints entre l'enceinte et le métal. — But à réaliser. — Procédés d'extraction des gaz. — Pompes. — Appareil ou table de pompage. — Marche générale de l'opération. — Finissage. — Organisation.

Le texte de cette communication sera donnée dans un prochain bulletin.

BIBLIOGRAPHIE

Cours pratique d'Électricité, à l'usage des Ecoles d'Industrie hôtelière, des apprentis des Ecoles professionnelles et des Ecoles primaires supérieures, par P. Roberjot, professeur de l'Enseignement technique. 1 vol. 21 cm × 13 cm, de IV-320 pages, avec 389 figures. Paris, Dunod, 1921.

Le seul titre de ce petit ouvrage indique nettement le but de l'auteur, et il est juste de reconnaître que ce but est habilement réalisé.

Après un exposé sommaire des lois fondamentales, on trouve, dans ce cours, des notions pratiques sur le groupement des conducteurs, les installations d'éclairage, les piles et accumulateurs, les aimants et les électroaimants, les courants induits, les installations de sonneries et de téléphones, les dynamos et moteurs, le chauffage par l'électricité ; enfin, quelques mots sur l'horlogerie électrique et sur les ascenseurs. C'est là un bagage dont peut apparemment se satisfaire la catégorie de lecteurs visée ici, et qui comporte, outre les élèves des écoles pratiques, les hôteliers, commerçants, industriels et, en général, les personnes soucieuses de pourvoir elles-mêmes à l'entretien de leurs installations.

Hydraulique générale et appliquée, par D. Eydoux, professeur suppléant à l'Ecole des Ponts et Chaussées. Préface de M. A. Blondel, membre de l'Institut. 1 vol. 23,5 cm × 16 cm, de VIII-510 pages et 214 figures. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1921.

Pour mener à bien un traité de ce genre, nul, certes, n'était mieux qualifié que M. Eydoux, dont les belles recherches sur l'hydraulique générale et ses applications industrielles, ainsi que la large contribution à l'étude et à la réalisation de très importantes usines hydroélectriques de la région des Pyrénées, sont connues de tous.

« Mon but, en écrivant cet ouvrage — dit l'auteur, en son avant-propos, — a été de condenser, dans un travail de dimensions restreintes, les connaissances d'hydraulique générale et appliquée indispensables aujourd'hui à tout ingénieur qui veut étudier, de façon rationnelle, des applications de cette science. »

S'attachant à présenter son sujet sous une forme aussi simple que possible, en limitant l'emploi du calcul au strict nécessaire, l'auteur a résolument supprimé tout développement historique, et laissé de côté certaines théories et applications qui, tout en étant considérées comme classiques, n'offrent guère d'utilité pour l'ingénieur ; par contre, il a insisté sur des sujets nouveaux et d'un intérêt réel pour les hydrauliciens. Ainsi, l'auteur a réalisé une œuvre de haute valeur technique, et, ajoutons, des plus personnelles.

Faute de pouvoir s'étendre sur le plan général de l'ouvrage et les rubriques extrêmement diverses qui y sont traitées, on se bornera à mentionner, comme particulièrement originaux et utiles, les chapitres relatifs aux notions d'ensemble théorique, aux applications aux conduites, vannes, ajutages et canaux d'amenée, à l'écoulement des eaux souterraines, à la houle et aux marées, aux cours d'eau naturels à fond mobile et affouillables, etc. Une dernière partie expose des méthodes et appareils de mesure industriels, à l'usage des ingénieurs spécialistes. A la fin de chaque chapitre, une bibliographie permet au lecteur de se reporter aux sources originales.

Quant à la belle préface de M. A. Blondel, on en goûtera, comme toujours, la substance et la forme incomparables.

Traction Électrique, par René Martin, Ingénieur des Arts et Manufactures. Préface de M. de Marchéna. 1 vol. 25 cm × 16 cm, de XXIII-781 pages, avec 585 figures et 57 planches hors texte. Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1920.

Comme le fait justement remarquer M. de Marchéna dans son excellente préface, le livre de M. René Martin est le premier ouvrage important, de langue française, qui ait paru sur ce sujet, depuis le traité classique de MM. A. Blondel et P. Dubois (1898) : source abondante et précieuse, où l'auteur a, du reste, souvent trouvé à puiser.

Or, la traction électrique, et en particulier la traction électrique sur voies ferrées, prend à notre époque une ampleur telle que la publication d'un traité com-

me celui-ci, embrassant toute la technique du sujet et scrupuleusement mis à jour, s'imposait sans conteste.

Ce qui donne à l'ouvrage une valeur très particulière, c'est qu'il émane d'un ingénieur spécialisé de longue date dans le domaine de la traction électrique, et n'ignorant rien de ce qui s'est fait dans ce domaine, non seulement en France, mais encore aux Etats-Unis, où l'électrification des voies ferrées a déjà pris le développement que l'on sait. Ainsi, l'expérience personnelle de l'auteur, qui apparaît dans les moindres détails, l'a conduit à une méthode d'exposition des plus rationnelles et des plus attrayantes.

Tandis que les deux premiers chapitres ont trait à l'histoire de la traction électrique et aux généralités, les trois chapitres suivants décrivent les moteurs à courant continu (étude, essais industriels et calculs des caractéristiques). Les chapitres VI et VII sont consacrés aux moteurs à courant alternatif, monophasé et triphasé; le chapitre IX, aux courants alternatifs triphasés, à la régulation de la marche des voitures et au système mono-triphasé; le chapitre X, à la construction des moteurs de traction. Les chapitres XI et XII, relatifs à la transmission de l'effort moteur à l'essieu, au freinage et à la récupération, sont particulièrement remarquables, de même que le chapitre suivant, très complet, relatif aux systèmes de traction à unités multiples et à des exemples d'applications typiques. La traction par courant continu haute tension fait l'objet du chapitre XIV. Enfin, les quatre derniers chapitres décrivent les accessoires de la traction, les trucks et caisses des voitures, la traction par automotrices indépendantes et les matériels spéciaux.

« Dans son ensemble, dit excellemment M. de Marchéna, l'ouvrage ne constitue pas seulement un ouvrage de vulgarisation destiné à permettre aux personnes non initiées de prendre une connaissance approfondie du sujet traité, mais il sera utile même aux professionnels par sa documentation abondante qui tient compte des derniers progrès réalisés. »

Répertoire de laboratoires français, par Ch. Maurain, Professeur à la Faculté des Sciences, directeur honoraire des Recherches scientifiques et industrielles et des Inventions. Fascicule 24 cm × 16 cm. Paris, Librairie de l'Enseignement technique, 1922.

Ce petit ouvrage présente, sous une forme très condensée, une documentation établie à la Direction des Recherches et Inventions. Il comprend deux répertoires de laboratoires, l'un par services, l'autre par ordre alphabétique, ce dernier avec de brèves notices indiquant l'objet, le rôle et les attributions des divers laboratoires, le genre des recherches et des essais qui y sont exécutés. Il peut être utile aux industriels, aux commerçants, aux personnes qui désirent des essais ou des renseignements scientifiques ou techniques, enfin aux laboratoires eux-mêmes.

Construction des réseaux d'énergie électrique (Manuel de l'Electricien), par M. M. Daval, Ingénieur E. S. E. 1 vol. 16 cm × 11 cm, de 275 pages, avec figures. Paris, J.-B. Baillière et fils, 1922.

Ce petit volume de la collection de la bibliothèque professionnelle s'adresse particulièrement aux monteurs. Il présente cependant, pour le technicien, le grand intérêt de le renseigner exactement par simple lecture sur le travail de l'exécution matérielle des lignes.

Essais des machines électriques, par C.-F. Gullbert, Sous-Directeur de l'Ecole supérieure d'Electricité, directeur des travaux d'essais de machines à l'Ecole supérieure d'Electricité, professeur suppléant au Conservatoire national des Arts et Métiers. 1 vol. 28 cm × 16 cm, de 560 pages, avec 275 figures (Encyclopédie d'électricité industrielle, dirigée par M. A. Blondel, membre de l'Institut). Paris, Baillière et fils, 1922.

La pratique des essais de machines a toujours été une des branches les plus intéressantes de l'électrotechnique, une de celles qui utilisent le mieux la forte culture scientifique des ingénieurs électriciens de notre époque.

De nombreux traités d'essais de machines ont déjà été publiés, mais nous ne pensons pas qu'aucun d'eux présente un ensemble aussi complet et un caractère aussi original, que celui qui paraît dans l'« Encyclopédie d'Electricité Industrielle ».

L'auteur, qui a professé plusieurs cours très remarquables sur la construction et les essais dans les meilleures écoles d'électricité, et à qui a été confiée, en connaissance de cause, la rédaction de ce volume, est, d'ailleurs, un des plus connus, peut-être même un des plus anciens spécialistes en cette matière, et, en tout cas, l'un des plus appréciés par ses nombreuses et importantes publications dans les meilleures revues techniques.

En rédigeant ce traité, il s'est proposé un triple but :

1° Faciliter la rapidité des essais, tout en leur conservant la plus grande rigueur, grâce à l'emploi des méthodes de corrections imaginées et utilisées par lui, au cours d'une carrière déjà fort longue, et appuyées, d'ailleurs, sur les théories les plus solides des divers genres de machines;

2° Développer l'usage des constructions graphiques permettant de prédéterminer les caractéristiques en charge à l'aide d'éléments expérimentaux faciles à relever ; cette prédétermination est rendue de plus en plus nécessaire par l'augmentation de la puissance des unités.

3° Discuter les méthodes de mesure des rendements et comparer la valeur relative des nombreuses formules adoptées ou préconisées par les électriciens.

L'ouvrage est divisé en sept parties dont voici les titres :

Génératrices à courant continu. Moteurs à courant continu. Rendement des dynamos et moteurs à courant continu. Alternateurs et moteurs synchrones. Transformateurs. Moteurs à courants alternatifs. Commutatrices.

Il comprend, en outre, en annexes, de nombreux règlements relatifs à la normalisation des essais établis par le Comité électrotechnique français et par l'Union des Syndicats de l'Electricité.

Il constitue ainsi une source de précieuses références en même temps qu'un guide sûr et attachant pour tout ingénieur qui s'intéresse à la vérification du matériel électrique. Il mérite également de figurer dans la bibliothèque du technicien non spécialiste, car il procède de méthodes scientifiques d'une portée très générale, et il se rattache heureusement aux théories les plus complètes de l'électrotechnique générale.

Machines électriques (théorie, essais et construction). *Electrotechnique appliquée*, par A. Mauduit, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy. Préface de M. A. Blondel, membre de l'Institut, 3^e édition, revue et augmentée. 1 vol. 25 cm × 16 cm. de XXVIII-1 180 pages, avec 504 figures. Paris, Dunod, éditeur. Prix: 80 fr.

Cet ouvrage comporte l'étude approfondie des essais, théorie, calcul et construction des machines électriques utilisées dans la pratique moderne.

La construction des machines est très développée et est toujours précédée de la théorie élémentaire et des essais.

Il comprend dix chapitres. Après l'exposé des notations et conventions, le premier chapitre traite de l'étude des appareils de mesure et des divers essais relatifs aux machines à courant continu.

Le chapitre II expose les points principaux de la théorie de la dynamo à courant continu : enroulements, réaction d'induit et commutation.

Le chapitre III est relatif au calcul des dynamos à courant continu et au calcul des machines spéciales (turbo-dynamos, moteurs de tramways, etc.).

Le chapitre IV comprend l'exposé des propriétés générales des courants alternatifs sinusoïdaux, l'étude des appareils de mesure pour courants alternatifs, les méthodes de mesure des puissances, etc...

Au chapitre V sont traités la théorie, les essais et la construction des alternateurs, avec formules, indications mécaniques et exemples.

Le chapitre VI est consacré aux transformateurs statiques, monophasés et triphasés.

Le chapitre VII se rapporte aux moteurs d'induction, traités d'après les travaux de M. Blondel, avec les corrections préconisées par la Chambre syndicale des Constructeurs de gros matériel.

Le chapitre VIII comprend l'étude complète des machines synchrones, et le chapitre IX donne la théorie des moteurs alternatifs à collecteur ; il se termine par l'étude du fonctionnement en récupération des moteurs monophasés de traction, transformés en génératrices shunt monophasées.

Enfin, le chapitre X groupe quelques compléments divers : étude expérimentale des formes d'onde des tensions et des courants ; redresseurs à vapeur de

mercure, transformation mutuelle des courants triphasés et diphasés ; dynamôs spéciales.

En résumé, cet ouvrage constitue un guide précieux pour les ingénieurs, électriciens, constructeurs ou exploitants.

Ils trouveront, dans ce livre, une exposition claire jointe à une grande abondance des renseignements pratiques nécessaires pour l'élaboration rapide d'un projet exempt de mécomptes dans sa réalisation.

La Technique du métier d'électricien, par R. Caillault, Ingénieur A. et M., directeur du cours d'apprentissage aux ateliers Cail et C. Baud, contremaître électricien, 2^e édition. 1 vol. 21 cm X 13 cm, de VIII-256 pages, avec 280 figures. Paris, Dunod, 1922. Prix: relié, 11 fr. ; cartonné, 10 fr. ; broché, 9 fr.

Cet ouvrage est tout particulièrement destiné aux professionnels, c'est-à-dire à l'ouvrier et au monteur électricien. Il donne un ensemble de procédés et de renseignements de métier, et les auteurs se sont efforcés d'en bien faire comprendre le caractère utilitaire. Dans ce but, chaque chapitre a été divisé en deux parties : une partie dite théorique, imprimée en petits caractères, et une partie pratique, imprimée en caractères ordinaires. Notons immédiatement qu'il convient de donner ici au mot « théorique » un sens tout à fait restreint, car ces quelques notions théoriques se limitent à l'exposé des lois et principes fondamentaux qui sont la base de toute l'électricité.

L'étude des appareils industriels et de leur emploi rationnel, les causes de fonctionnement défectueux, la recherche des pannes diverses, les appareils et les installations font l'objet de la partie pratique.

Enfin, quelques problèmes courants avec leurs solutions, des schémas de montage nombreux et détaillés, achèvent de faire de cet ouvrage un vade mecum de l'ouvrier et du monteur-électricien.

Notions d'Electricité générale, à l'usage des Ecoles techniques et professionnelles, des contremaîtres et monteurs, par Charles Fleury, ancien élève des Ecoles d'Arts et Métiers et de l'Ecole supérieure d'Electricité. 1 vol. 21 cm X 13,5 cm, de 456 pages, avec 372 figures. Paris, Dunod, 1920.

Cet ouvrage élémentaire est certainement de ceux qui justifient le mieux leur titre. Sans prétendre à une extrême originalité d'exposition, il guide le lecteur, avec autant de sûreté que d'attrait, vers un but bien défini, qui est de l'initier aux phénomènes électriques, de lui en laisser entrevoir les théories, et surtout de lui faire comprendre le fonctionnement des machines et des appareils les plus répandus et les plus modernes.

L'ouvrage comprend sept chapitres, savoir. I : Phénomènes électriques. Courant électrique. II : Phénomènes électrochimiques. Action chimique des courants continus. Electrolyse. Accumulateurs électriques. III : Phénomènes électromagnétiques. Champ magnétique produit par un courant électrique. Electroaimant. IV : Phénomènes d'induction. Courants de Foucault. Self-induction. Production du courant dans les machines électriques. V : les courants alternatifs. Courants monophasés ou à deux fils. Courants diphasés. Courants triphasés. VI : Machines à courant continu. Différents modes d'excitation. Transformation du courant continu. Distribution du courant continu. VII : Les moteurs électriques. Moteurs à courant continu (série, shunt, compound). Moteurs à courants alternatifs (synchrone, asynchrone, à collecteur). VIII : Tarification de l'énergie électrique.

Ajoutons, tout à la louange de l'auteur et de l'éditeur, que les figures, nombreuses et claires, sont en parfaite harmonie avec le texte.

IL Y A TRENTE ANS

Sur le rendement des transformateurs et des distributions par transformation (M. R.-V. Picou). — Fontaines lumineuses automatiques à jets multicolores (M. G. Trouvé).

Le Gérant : J. Guyot.

IMP. HENRIOT - 30, RUE CENNET, PARIS

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE

Compte rendu de la réunion ordinaire mensuelle du mercredi 6 décembre 1922 : Admission de membres titulaires, p. 522. — Membre décédé, p. 522. — Détermination rapide du champ magnétique terrestre. Méthode particulière de comparaison de champs magnétiques (M. A. PÉROT), p. 522. — Transmission sans fil des images à distances (M. BELIN), p. 522. — Nécrologies : Jules Carpentier, p. 523 ; François Brocq, p. 529. — Les ampoules à rayons X et leur construction (M. JOHANNÈS), p. 531.

INFORMATIONS, p. 581.

BIBLIOGRAPHIE, p. 582.

IL Y A TRENTE ANS, p. 582.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE TOME II (4^e SÉRIE), p. 583.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS CITÉS DANS LE TOME II (4^e SÉRIE) p. 586.

COMPTE RENDU

DE LA

REUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 6 décembre 1922. (1)

PRÉSIDENCE DE M. MARCEL BRILLOUIN

La séance est ouverte à 20 h. 35.

Le procès-verbal de la précédente réunion mensuelle est adopté.

La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

4^e SÉRIE, TOME II, 1922. — N° 20

29

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

D'Albertas (Jean-Félix-Marie), Ingénieur aux Etablissements Blériot, 35, rue de Berry, Paris, 8°. — Présenté par MM. P. Bossu et M. Leblanc.

Chapusot (Auguste-Eugène-Jules), Chef du service des Etudes à la Société des Etablissements L. Blériot, 121, rue de l'Abbé-Groult, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Bossu et Iglésis.

Kempf (Jules), Ingénieur, 34, rue de la Linne, à Mulhouse (Haut-Rhin). — Présenté par MM. M. Meyer et F. Vernet.

Matte (Marcel-Henri-César), Ingénieur, 3 bis, rue Mizon, à Paris, 15°. — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Vache (Robert-Louis), Ingénieur E. S. E., 2, rue Paul-Lacroix, à Montpellier (Hérault). — Présenté par MM. P. Janet et C.-F. Guilbert.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société française des Electriciens.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de M. *Chailloux*. Il exprime à la famille de ce membre les condoléances de la Société.

L'ordre du jour appelle les communications techniques.

Détermination rapide du champ magnétique terrestre. Méthode particulière de comparaison de champs magnétiques (projections, expériences), par M. A. PÉROT.

Le principe de l'appareil est le suivant :

On fait tourner à 200 tours par seconde une bobine en court circuit ; celle-ci réagit sur un enroulement fixe relié par l'intermédiaire d'un amplificateur à un téléphone. On compense la composante du champ terrestre normal à l'axe de rotation de la bobine à l'aide de deux bobines rectangulaires dont on a déterminé le coefficient par comparaison avec une boussole d'Helmholtz.

Deux opérations faites en quelques minutes dans deux positions rectangulaires permettent de déterminer la déclinaison, l'inclinaison et la force totale.

Transmission sans fil des images à distance, par M. BELIN.

Les textes de ces communications seront reproduits dans un prochain bulletin, les auteurs désirant donner les derniers résultats d'expériences en cours.

NÉCROLOGIE

JULES CARPENTIER

MEMBRE DE L'INSTITUT, ANCIEN PRÉSIDENT DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES ELECTRICIENS.

Il serait, sans doute, possible de caractériser d'un mot la partie principale de l'œuvre scientifique de Carpentier en disant qu'elle a consisté à faire concourir les principes mêmes et les méthodes de la Science au perfectionnement de l'outillage que requiert son développement.

Une œuvre de ce genre, bien qu'apparaissant comme plutôt accessoire par rapport à ce qui constitue l'objet propre de la Science, ne saurait laisser indifférent aucun savant, fût-il voué aux recherches de l'ordre le plus abstrait, car, ainsi qu'au témoignage de Chauveau, Claude Bernard aimait à le répéter, « la création d'une bonne méthode technique et d'un bon instrument peut rendre plus de services à la Science que le perfectionnement des hautes spéculations théoriques qui en sont les fondements rationnels ».

M. Emile Picard, de son côté, a insisté sur l'inanité, en ce qui concerne l'étude des lois physiques, des spéculations théoriques non étayées d'expériences, faute d'une technique suffisante. « ...Les progrès des sciences expérimentales, dit-il ⁽¹⁾, sont liés à ceux de la technique. »

Or, c'est aux progrès de cette technique, indispensable auxiliaire de l'avancement de la Science, qu'avec un plein succès Jules Carpentier a consacré la plus grande part de son labeur. Il s'est ainsi assuré une place très honorable dans l'histoire du mouvement scientifique contemporain.

Né à Paris le 30 août 1851, Carpentier, après de fortes études poursuivies au Lycée Louis-le-Grand (où il compta parmi ses maîtres l'un des vénérés doyens actuels de l'Académie des Sciences, M. Violle), fut admis en 1871 à l'Ecole Polytechnique en même temps que son futur illustre confrère le Maréchal Foch. Il en sortit deux ans plus tard dans le Corps des Manufactures de l'Etat, ou, suivant une locution d'un usage très courant, dans « les Tabacs ». Il ne devait y faire qu'un stage bien écourté.

⁽¹⁾ *La vie et l'œuvre de Pierre Duhem*, p. 28.

Entraîné par le goût de la construction mécanique, qui s'était révélé chez lui de très bonne heure, il rêva d'une autre carrière où il lui fût possible de donner un plus libre essor à ses propres initiatives ; et, tout d'abord, il se résolut à compléter la haute culture théorique, qu'il avait acquise jusque-là, par un apprentissage strictement pratique ; doué d'un cerveau capable de concevoir, il voulut mettre à son service une main apte à exécuter. D'une telle réunion de qualités il n'est que de bien rares exemples.

L'homme chez qui le travail de la pensée a pris une certaine ampleur ne se sent généralement pas enclin à s'appliquer à des détails de réalisation matérielle. Chez Carpentier, au contraire, une telle vocation était si décidée qu'il n'hésita pas, dès 1876, à abandonner tous les avantages que comportait sa situation d'ingénieur de l'Etat pour entrer, comme simple ouvrier ajusteur, dans les ateliers de la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée où, après dix mois d'un laborieux stage, il devenait adjoint à un ingénieur principal, puis lui-même ingénieur.

Les circonstances ont, depuis lors, détourné Carpentier de la nouvelle carrière où il avait ainsi débuté ; mais le rude apprentissage pratique auquel il s'était soumis n'a pas, tant s'en faut, été pour lui sans utilité par la suite. Grâce à cet apprentissage, tout au contraire, il s'est trouvé admirablement armé pour mener à bien l'œuvre à laquelle il devait finalement attacher son nom.

Ce fut la mort du célèbre constructeur Ruhmkorff, survenue sur ces entrefaites, qui décida de l'orientation définitive de sa carrière. Mis, dès 1878, en possession, par voie d'adjudication, de la succession du vieil artiste, à qui les savants étaient déjà redevables d'une si précieuse collaboration technique, il eut à cœur de poursuivre et de développer son œuvre conformément aux besoins nouveaux résultant du brillant essor pris dès cette époque par la science électrique.

Dans la genèse de toute branche des sciences expérimentales, comme l'a si bien montré M. Le Chatelier (¹), à la période où l'observation accumule les faits, mettant en évidence l'existence de certaines grandeurs nouvelles, succède celle où la mesure permet d'entreprendre l'analyse quantitative de ces grandeurs, sur

(¹) Dans sa réponse à une enquête sur l'organisation de l'enseignement à l'Ecole Polytechnique, ouverte par le Bulletin mensuel polytechnicien *X-Information* (numéro du 25 avril 1922, p. 1).

laquelle doit s'appuyer le raisonnement, au besoin étayé de calcul, pour aboutir, selon les règles de la saine méthode scientifique, à l'énoncé des lois, but ultime de la Science.

Lorsque Carpentier devint le successeur de Ruhmkorff, la science de l'électricité, en pleine évolution, entraînait dans la phase de son développement où la mesure prenait une importance prépondérante. Il s'agissait de doter nos laboratoires de tout un outillage de mesures électriques, d'une haute sensibilité et d'une grande précision, fabriqué toutefois industriellement. Sur ce point, nous avons été devancés par l'Angleterre, grâce aux directions que les constructeurs de ce pays avaient reçues d'une pléiade de savants qui s'étaient résolument attelés à la question et dont le plus illustre fut Lord Kelvin. Aussi, à l'issue de l'Exposition Universelle de 1878, la France était-elle encore, sous ce rapport, tributaire de l'Angleterre, son industrie nationale étant alors, suivant la remarque de Carpentier lui-même, « incapable de rien produire dans cette branche d'où dépendait la vitalité de toutes les autres ». Pour que nous fussions mis, à ce point de vue, sur un pied d'égalité avec nos voisins d'Outre-Manche, un effort exceptionnel était nécessaire, de nature à la fois scientifique et industrielle. Ce fut là, pour Carpentier, la première occasion marquante d'affirmer sa maîtrise.

Pour créer tous ces types d'instruments de mesures électriques, devenus classiques depuis lors, il ne lui suffit pas de mettre ingénieusement en œuvre les plus récentes données de la science, dont il avait, comme étudiant, acquis la connaissance ; il lui fallut encore organiser dans ses ateliers une méthode nouvelle de travail reposant sur la division de la main-d'œuvre, absolument négligée jusque-là dans cette branche spéciale de l'industrie, en même temps que sur la perfection, poussée à l'extrême possible, des façons élémentaires, grâce à l'emploi des outils les plus perfectionnés et des procédés mécaniques développés dans la plus large mesure. Nombre de machines mises ainsi par lui en usage ont d'ailleurs été étudiées et construites dans ses propres ateliers. Ainsi qu'il l'a fait remarquer lui-même, leur caractéristique est d'être massives et robustes alors que leur fonction consiste toujours à fabriquer des pièces délicates, attendu que « plus une pièce est petite, plus l'outil qui sert à la produire doit être rigide et indéformable ». On conçoit aisément ce que, pour ce genre d'étude, son expérience de l'atelier a pu

ajouter aux principes scientifiques qu'il avait puisés sur les bancs des grandes écoles.

A côté de ses instruments de mesures électriques, une mention spéciale est due, dans le même domaine, à la création d'une série importante d'appareils télégraphiques combinés et exécutés pour réaliser la belle invention, conçue par M. Baudot, du télégraphe multiple imprimeur. C'est, sans contredit, l'expérience et l'ingéniosité de Carpentier qui ont, matériellement, doté de tous ses organes ce merveilleux appareil, important facteur du développement de notre civilisation.

Ce n'est, au reste, pas seulement dans le champ des applications de l'électricité que s'est manifestée l'activité créatrice de Carpentier. Elle a encore trouvé à se dépenser dans d'autres domaines où on lui a dû de précieuses innovations.

La fixation des improvisations musicales a notamment retenu son attention ; le problème qu'elle posait consistait à enregistrer automatiquement les morceaux de musique exécutés sur un clavier. Sous le nom de mélographes, Carpentier en a imaginé plusieurs ingénieuses solutions, complétées par l'invention du mélotrope, destiné à permettre l'exécution automatique, sur le clavier, des morceaux enregistrés par le mélographe.

Dans le domaine de l'optique appliquée, les incursions de Carpentier n'ont pas été moins intéressantes, ni moins couronnées de succès. Tout le monde connaît aujourd'hui sa photo-jumelle à répétition, heureusement complétée par ces amplificateurs qui permettent de « tirer de petits clichés des images positives agrandies, tout en affranchissant l'opérateur de la nécessité d'une mise au point toujours très délicate ».

Carpentier a, en outre, grandement contribué à améliorer l'étude analytique des objectifs par l'invention d'ingénieux instruments permettant de déterminer promptement et exactement la distance focale d'un objectif et la position de ses points nodaux (focomètre) ou d'explorer son volume focal (focograde) ; il s'est utilement occupé aussi du façonnage des verres sphériques et du centrage des lentilles dans leurs montures.

Cette expérience consommée de la construction des systèmes optiques lui a permis de résoudre avec élégance le problème posé par la navigation sous-marine consistant à assurer, pour un navire submergé, la vision des objets extérieurs. L'appareil que, sous le nom de périscopes, il a réalisé à cet effet, est aujourd'hui

d'hui universellement connu.

Il convient aussi de ne pas oublier la part importante qu'a eue Carpentier dans la mise au point du procédé trichrome de photographie en couleur, dont le principe était dû à Ducos du Hauron.

Il va sans dire que le savant inventeur qui, chez Carpentier se doublait d'un ardent patriote, mit sans compter toutes les ressources de son savoir et de son expérience au service du pays lors de la grande épreuve de 1914-1918. Il le fit avec un zèle inlassable malgré le mauvais état de sa santé et bien que ne disposant plus, par suite de la mobilisation, que d'un personnel réduit et inexpérimenté.

Ces conditions défavorables ne l'empêchèrent ni de concevoir des appareils nouveaux répondant à divers desiderata révélés par la conduite même de la guerre, ni d'en établir les multiples exemplaires que requéraient les besoins de l'Armée : nouveaux types de périscopes pour sous-marins ; périscopes de tranchée ; périscopes terrestres de grande hauteur ; hausses automatiques pour canons d'avions ; lunettes pour mitrailleuses ; niveau pour lance-bombe ; nombreux appareils destinés à la télégraphie sans fil ou à des mesures électriques spéciales.

De plus, appelé l'un des premiers à organiser la fabrication intensifiée des munitions, Carpentier se consacra spécialement à celle des petites fusées d'obus, qui touchait de plus près à son domaine.

Il ouvrait d'ailleurs largement ses ateliers à tous les constructeurs qui désiraient avoir recours à ses conseils ; aussi peut-on dire que, dans l'immense effort industriel qui s'est développé au cours de la guerre, on retrouve la trace de son inspiration en ce qui concerne non seulement le choix de l'outillage et des méthodes de travail, mais encore l'organisation du contrôle des fabrications.

Bien que tout l'ensemble des inventions, dont les principales viennent d'être sommairement passées en revue, constitue déjà une masse imposante, il ne saurait, à lui seul, faire naître une idée suffisante de l'activité scientifique de Carpentier. Continuant en cela la tradition de son prédécesseur Ruhmkorff, il n'a jamais cessé, avec le plus entier dévouement et le plus parfait désintéressement, de mettre au service des savants, poursuivant des recherches expérimentales, les ressources infinies de sa compé-

tence toute spéciale en fait de réalisations matérielles. Par là, sous une forme discrète, il n'a pas laissé de contribuer encore au progrès général de la Science.

Les services qu'il a ainsi rendus, le haut mérite qui lui a été partout reconnu lui ont valu les plus flatteuses distinctions. Membre actif et écouté de diverses sociétés de caractère scientifique ou industriel, il a été appelé aux honneurs de la présidence dans nombre d'entre elles, notamment au Syndicat professionnel des Industries électriques, à la Société française des Electriciens, à l'Association française pour l'Avancement des Sciences, à la Société des Ingénieurs civils, à la Société de Photographie... Appelé à siéger au Bureau des Longitudes en 1897 et, à l'Académie des Sciences, en 1907, il reçut en cette même dernière année la croix de commandeur de la Légion d'honneur.

Dans tous les groupements auxquels il a appartenu, la cordialité de ses relations et la sûreté de ses avis lui ont valu la sympathie et l'estime générales. Sa mort, survenue à la suite du terrible accident dont il fut victime le 26 juin 1921, provoqua chez tous ceux qui l'ont connu d'unanimes et sincères regrets ; mais son souvenir restera en bonne place dans leur mémoire. N'ayant cessé, au cours de sa laborieuse existence, de s'appliquer à des problèmes intéressant le perfectionnement de l'utilisation de la Science ainsi que la construction de nombre d'instruments d'utilité pratique, il a su en trouver de si heureuses solutions que son nom y restera à tout jamais attaché. Pour un inventeur de sa qualité, c'est là la consécration définitive : pendant de longues années encore, par les réalisations dont elle a été la source, l'œuvre de Carpentier continuera d'être présente aux regards des hommes de science et de maintenir, en quelque sorte, son souvenir vivant parmi eux.

NÉCROLOGIE

FRANÇOIS BROCC

TRÉSORIER DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DES ÉLECTRICIENS.

» Parmi les pertes que notre groupement a récemment éprouvées, il en est une qui nous touche tous très particulièrement, celle de François Brocc, décédé le 20 octobre 1921 ⁽¹⁾, à la suite d'une longue et douloureuse maladie, à l'âge de 65 ans.

» Sorti de l'Ecole centrale des Arts et Manufactures en 1881, M. Brocc fut d'abord ingénieur dans une entreprise de travaux publics ; mais il s'orienta rapidement du côté de la mécanique et de l'électricité en devenant le collaborateur de Frager, de la maison Michel, qui se transforma plus tard et prit le nom de Compagnie pour la Fabrication des Compteurs et Matériel d'Usines à Gaz.

» M. Brocc se consacra tout d'abord aux compteurs à eau, puis bientôt aux compteurs électriques, appareils indispensables au développement de l'électricité industrielle qui venait de naître.

» Les progrès incessants réalisés dans cette voie placèrent bientôt la Compagnie des Compteurs à l'un des premiers rangs.

» Pendant la guerre, M. Brocc, qui, en raison de son âge, n'était pas appelé sous les drapeaux, se consacra à diverses inventions que nos Armées réclamaient.

» C'est à lui que l'on doit un appareil correcteur pour le tir contre avions, qui a permis à notre artillerie d'abattre plus de 300 avions ennemis.

» Non seulement M. Brocc s'occupait des expériences de laboratoire et de la construction des appareils, mais il n'hésitait pas à se rendre courageusement sur le front, dans des endroits dangereux, pour étudier l'emploi des appareils et les perfectionnements à leur apporter.

» Tout récemment, il s'était consacré à l'étude d'un appareil de télépointage pour la Marine, permettant de concentrer le feu des tourelles des cuirassés.

» M. Brocc avait reçu, à l'occasion de sa collaboration à la Défense nationale, la croix de la Légion d'honneur au titre mi-

⁽¹⁾ Notice biographique lue à la séance mensuelle du mercredi 2 novembre 1921, par M. J. Rey.

litaire, en même temps que la décoration de Commandeur de l'Ordre anglais du British Empire.

» Pour notre Société, M. Brocq a été non seulement un appui, mais également un collaborateur et un ami de tous les instants. Il y était entré en 1898 et il fut appelé au Comité en avril 1900, puis, en 1905, à la Commission des Comptes. Il fut nommé à nouveau au Comité en 1906 et 1910. Enfin, en 1913, il voulut bien assumer les fonctions de Trésorier et il eut, à ce titre, à s'occuper de notre comptabilité et de l'état assez précaire de nos finances pendant la guerre, charge qui ne laissa pas d'être lourde.

» Aux qualités professionnelles si remarquables de M. Brocq venaient s'ajouter les qualités morales d'un caractère aussi élevé que bon.

» Sa parfaite loyauté, sa droiture et, il faut bien l'ajouter, sa gaieté assez humoristique, en faisaient l'un des compagnons les plus charmants que l'on pût rencontrer. Il joignait à cela un rare bon sens et ses conseils avaient pour nous une véritable valeur. Dans les moments difficiles, il savait être optimiste dans le bon sens du mot et encourager ceux qui l'entouraient.

» Je suis certain, Messieurs et chers Collègues, que tous ceux qui l'ont connu parmi nous conserveront fidèlement son souvenir.

» Je suis votre interprète en exprimant à sa famille nos regrets les plus vifs ainsi que la profonde sympathie avec laquelle nous prenons part à sa douleur. »

LES AMPLOUS A RAYONS X ET LEUR CONSTRUCTION (1)

Avant d'aborder le sujet principal de cette étude, l'auteur fait, tout d'abord, un rappel extrêmement rapide de la physique des rayons X. Il examine, ensuite, les conditions physiques de leur production, puis il aborde la fabrication des appareils basés sur les principes exposés.

NATURE DU RAYONNEMENT X. MOYEN DE LE PRODUIRE

M. JOHANNÈS. — « Les rayons X sont des ondes électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde; ils ne sont surpassés que par les rayons γ du radium (voir page 532). Dans le tableau ci-après, nous avons reproduit, à titre de comparaison, les différentes longueurs d'onde d'origine électromagnétique et calorifique. L'identification certaine de ces rayons avec les autres ondes électromagnétiques n'est pas très ancienne : elle date des expériences de Laüe, faites vers 1913 ; ce savant obtint une véritable diffraction du rayonnement X et γ en employant un réseau formé par les atomes d'un cristal.

» Il est difficile de dire où commence le rayonnement X, puisqu'il y a un chevauchement dans les ondes produites par les deux genres de procédés. Il est cependant probable qu'il y a une différence notable entre ces radiations : l'une, celle du tube à hydrogène, est périodique, tandis que l'autre, celle de l'expérience de Thomson, comme toutes les radiations X et γ , n'est probablement formée que d'une seule pulsation.

» Ces radiations très courtes ne sont pas, en effet, produites par un électron vibrant, mais simplement par l'accélération d'un électron. Cette accélération peut d'ailleurs être positive ou négative sans rien changer au phénomène.

» C'est ainsi que l'on admet que les rayons γ du radium sont dus à l'accélération énorme que prend un électron chassé de l'atome lors de son explosion, en passant du repos à une vitesse voisine de celle de la lumière dans un espace de l'ordre de grandeur de l'atome.

» C'est tout le contraire qui se produit lors de l'émission des

(1) Communication faite à la séance du mercredi 8 novembre 1922.

TABLEAU DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Origine	Longueur d'onde		Remarques	
Ondes électromagnétiques hertziennes.	Poste T. S. F.	15 km depuis 4 000 m l'infini 2 000 m jusqu'à de 600 m 0,6 cm. à 2 m de 20 cm à 0,6 cm	Les grands postes de radiocommunication ont des longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre. Certains dépassent 15 km. Marconi en 1908. Longueur d'onde d'émission de la Tour Eiffel, signaux horaires. Tous postes de radiocommunication, navigation et intercommunications. Ondes de petite longueur obtenues dans des études physiques de 1897 à 1908, oscillateur de Lebedew.	
Radiations inconnues		de 0,6 cm à 0,314 cm		
Infra-rouge		3140000 angstrom l'angstrom valant 10 ⁻⁷ mm (Å) 967 000 — 53 000 — 8 000 —	La plus grande longueur d'onde observée dans un spectre d'émission d'une lampe à vapeur de mercure (chiffre publié en 1911 par Rubens). Rayons restants iode de potassium, bec Auer comme source. Limite du spectre solaire observé par Langley. Limite du spectre visible.	
Spectre visible	Radiations calorifiques et spectre solaire	6 707 Å 6 800 — 6 000 — 5 895 — 5 800 — 5 200 — 4 700 — 4 100 — 3 900 —	Flamme du lithium. Rouge spectre solaire. Orangé — Flamme de sodium. Jaune spectre solaire. Vert. Bleu. Violet. Limite du spectre visible.	
Ultra-violet		3 000 Å 2 920 — 1 850 — 1 030 —	Limite d'utilisation des appareils spectroscopiques en verre. Limite du spectre solaire (absorption atmosphérique). Limite d'absorption de l'air sous faible épaisseur. Limite de radiation de nature périodique, décharge dans un tube à hydrogène raréfié, spectrographe dans le vide.	
Rayons X		10 volts 24,7 kv 200 kv 216 kv	1 230 Å 0,5 — 0,0617 — 0,057 —	Expérience de Thomson sous 10 v. Premiers rayons passant à travers le verre. Cas d'un tube soumis à une différence de potentiel de 200 kv (bobine donnant 40 cm d'étincelle équivalente). Il ne semble pas jusqu'ici y avoir de limite supérieure à ce phénomène.
Rayons γ		0,007 Å	Radium.	

rayons X. L'électron arrive avec une vitesse considérable, jusqu'à $2,65 \cdot 10^{10}$ cm:s, sur un atome solide et s'arrête produisant ainsi une l'accélération n'a aucune importance ; sa valeur absolue seule rayons X et γ sont donc absolument identiques, car le signe de l'accélération n'a aucune importance, sa valeur absolue seule compte.

MÉCANISME DE L'ÉMISSION DES RAYONS X. — Lorsqu'une charge électrique, primitivement au repos, est mise en mouvement, même si cette charge est sans support matériel (électron), donc sans inertie au sens général de ce mot, il faudra dépenser une certaine énergie pour la mettre en mouvement. Cela peut paraître paradoxal, mais s'explique, cependant, aisément ; au repos, la charge électrique n'est entourée que d'un champ électrique, tandis que, dès qu'elle est mise en mouvement, un champ magnétique prend naissance, puisque tout déplacement d'une charge électrique est assimilable à un courant électrique véhiculant la même intensité dans la même direction. C'est précisément l'énergie nécessaire à la création de ce champ magnétique que l'on est obligé de dépenser pour mettre la charge en mouvement, et qui donne à cette charge immatérielle les apparences de l'inertie d'un corps matériel ; à cause de son origine, cette inertie est dite « inertie électromagnétique ».

» Tant que le mouvement sera uniforme, rien de particulier ne se passera ; le champ électrique et le champ magnétique accompagneront la charge dans son déplacement, autrement dit, la particule électrisée emportera avec elle, localisée dans l'espace, l'énergie dépensée pour la mettre en mouvement.

» Examinons maintenant ce qui se passera lorsque la charge subira un changement de vitesse, c'est-à-dire lorsqu'il y aura accélération, un arrêt, par exemple. Soit une charge e (un électron) en mouvement uniforme, à une vitesse plus petite que celle de la lumière (fig. 1). Supposons que, à partir de la position e , il subisse une force retardatrice qui l'arrête finalement en e' après un temps t ; traçons des lignes de force radiales entourant l'électron quand il s'immobilise dans la position e' , et celles qu'il aurait eues s'il était réellement parvenu en e' . Les lignes pleines représentent le champ électrique quand l'électron s'est arrêté après que toute perturbation s'est calmée, et que le champ magnétique créé lors de la mise en mouvement de la charge a dis-

paru. Les lignes pointillées représentent le champ électrique de l'électron supposé au point e'' ; ce sera donc la forme du champ dans les régions éloignées avant le passage de la perturbation. En effet, les lignes de force doivent être considérées, d'après Faraday, comme ayant une masse transversale, c'est-à-dire que, de même que pour la charge électrique en mouvement et pour des raisons analogues, il faut dépenser de l'énergie pour déplacer transversalement une ligne de force électrique. Ces lignes possèdent donc de l'inertie et lorsque l'électron s'est arrêté en e' , elles ont continué leur chemin comme si l'électron était réellement parvenu en e'' .

» Ceci posé, cherchons à nous rendre compte de la marche de

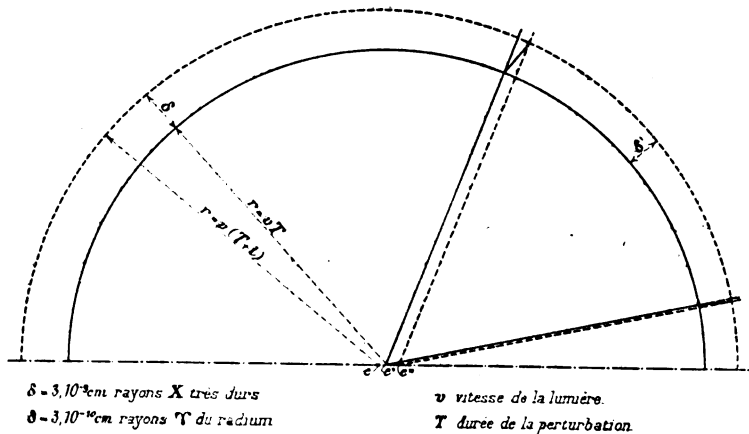


Fig. 1. — Schéma de la théorie de Stokes et Wiechert, pour expliquer la nature du rayonnement X.

la perturbation après un temps T compté à partir de l'arrêt en e' . Le commencement de la perturbation a donc eu lieu depuis un temps $T + t$, puisque la durée de l'arrêt ou durée de la perturbation est t .

» Se donner un temps, c'est aussi se donner le lieu de ce phénomène puisque nous savons que la perturbation se déplace le long des lignes de Faraday avec la vitesse de la lumière ; décrivons donc deux circonférences, l'une de rayon vT centrée sur e' ; l'autre, de rayon $v(T+t)$ centrée sur e , v étant la vitesse de la lumière.

» Ces deux circonférences représenteront la trace dans le plan de la figure de deux sphères de rayon correspondant entre lesquelles est contenue la perturbation.

» A l'intérieur de la première sphère, la forme du champ est celle qui est figurée en traits pleins et qui correspond au champ créé par l'électron immobile du point e'.

» A l'extérieur de la seconde sphère, la distribution est, comme nous venons de le voir, celle qui correspond à l'électron placé au point e''.

» Le passage de la perturbation a donc eu pour effet de ramener en arrière tout le système de lignes de force qui, au loin, avaient continué leur marche, n'ayant encore subi aucune action modifiant leur état de mouvement. Cette action est produite par la disparition du champ magnétique, et l'énergie contenue entre les deux sphères est précisément celle qui avait été dépensée pour créer le champ magnétique lors de la mise en marche de l'électron.

» C'est cette perturbation qui constitue le rayonnement X ou γ , suivant l'épaisseur de l'onde. Cette distance, que l'on désigne par la lettre δ , est évidemment caractéristique de la longueur d'onde, mais on ne peut pas, cependant, la confondre avec elle, faute de savoir comment se produit exactement le recul de la ligne de force pendant la perturbation ; δ a respectivement pour valeur : 3.10^{-9} cm pour les rayons X très durs et 5.10^{-10} cm pour les rayons γ du radium.

» C'est par d'autres moyens qu'on a pu déterminer la longueur d'onde. On sait, actuellement, produire des spectres de rayons X comme l'on sait produire depuis longtemps des spectres de rayons lumineux, les moyens employés sont sensiblement les mêmes ; mais, tandis que, pour produire un spectre en lumière visible, il suffit de posséder un réseau de diffractions comprenant quelques centaines de traits par millimètre, il faut, pour les rayons X, s'adresser au réseau formé par les atomes d'une substance cristallisée, dit réseau de Bravais, comme le fit Laüe en 1913.

» Cette théorie a été donnée presque simultanément par Stokes et Wiechert ; elle a été très contestée et l'est encore actuellement, car elle ne rend pas compte de tous les faits constatés expérimentalement ; c'est cependant la théorie qui en explique le plus grand nombre et qui, vraisemblablement, finira par dominer, après quelques retouches.

» De tout ceci, il faut retenir :

» 1° Les rayons X sont essentiellement de même nature que la lumière et sont de longueur d'onde beaucoup plus courte ;

» 2° Il est probable qu'ils sont formés d'une pulsation apparemment unique d'épaisseur très petite, 3.10^{-9} cm pour les rayons X et 5.10^{-11} cm pour les rayons du radium.

» 3° En dehors des sources naturelles que constituent le radium et les autres substances radioactives pour produire du rayonnement, il faut :

- » a) Lancer des charges électriques à grande vitesse ;
- » b) Les arrêter aussi rapidement que possible.

» Disons de suite que les vitesses qu'il faut réaliser ne peuvent s'obtenir que dans l'intérieur de l'atome, comme dans le cas du radium, ou en l'absence presque complète de matière. En effet, même dans un gaz, matière la plus propre à se laisser pénétrer par des projectiles à grande vitesse, il est impossible d'abord d'obtenir un champ assez intense pour communiquer une vitesse suffisante à une charge électrique; l'étincelle jaillirait bien avant ce résultat ; ensuite, l'obtention de grandes vitesses est encore empêchée par le freinage intense que produirait le choc de la particule électrisée contre les molécules du gaz. Ces impossibilités disparaissent quand on abaisse la pression, ce qui revient à raréfier la matière, et c'est la raison qui impose la décharge électrique dans les gaz raréfiés pour la production des rayons X.

» LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE DANS LES GAZ RARÉFIÉS. — Il y a deux types de décharges dans les gaz raréfiés :

» 1° Celle qui utilise les gaz résiduels comme agents producteurs d'électrons à la cathode. Dans ce cas, il est donc indispensable de ne pas trop abaisser la pression. J'appellerai décharge ionique, ce premier processus.

» 2° Celle qui n'utilise pas les gaz résiduels, qui doivent, par conséquent, être amenés à la plus faible pression réalisable. Il faut, bien entendu, pourvoir l'appareil d'un autre moyen pour produire des électrons à la cathode ; c'est, très généralement, l'échauffement d'une partie de celle-ci que l'on utilise. On sait que l'émission d'électrons à partir d'un corps chaud a été découverte par Edison, puis étudiée dans son mécanisme intime et appliquée récemment à la production des rayons X, par Coolidge et Langmuir. J'appellerai décharge électronique ce second processus.

» Dans l'un ou l'autre de ces types de décharge, le seul phénomène indispensable est la production d'électrons à la cathode ;

tous les autres phénomènes ne sont qu'accessoires ou servent à déterminer ou faciliter cette production. La présence d'électrons à la cathode est nécessaire et suffisante pour qu'une décharge ait lieu entre deux électrodes portées à des potentiels différents, quelle que soit la valeur de la pression.

» 1° *Décharge ionique.* — Lorsqu'on établit une différence de potentiel suffisante entre deux électrodes séparées par un espace rempli de gaz, on voit apparaître, suivant la pression, un phénomène lumineux différent. A la pression atmosphérique ou à des pressions voisines ou supérieures, c'est l'étincelle; à des pressions plus réduites, ce sont des aspects tout autres. Il est probable que, malgré leur différence apparente, ces phénomènes lumineux ont un mécanisme général à peu près analogue; je n'étudierai ici que la décharge à basse pression, qui est la seule intéressante pour la production de charges électriques à grande vitesse.

» Pour qu'il y ait décharge dans un gaz, il faut qu'un agent vecteur circule d'une électrode à l'autre pour transporter le courant. S'il y a des gaz, comme dans le cas présent, ce seront leurs molécules qui devront remplir cet office. Cependant, par définition même, on sait que le champ électrique ne peut exercer une force que sur des corps électrisés, et la molécule, également par définition, doit être considérée comme électriquement neutre. Or, il est avéré que l'on peut toujours, si l'on applique une différence de potentiel supérieure à une certaine limite, obtenir une décharge à travers un gaz s'il est à une pression suffisante, même si l'on a pris toutes les précautions utiles pour décharger initialement ce gaz. Faut-il donc admettre que le champ électrique peut provoquer le scindement de la molécule en deux charges, c'est-à-dire ioniser le gaz; non, car on a découvert que, sous l'action d'une cause inconnue, probablement une radiation très pénétrante, le gaz primitivement neutre s'ionise et peut, par conséquent, fournir des centres chargés auxquels le champ électrique communiquera une certaine mobilité.

» Les charges électriques que l'on trouve dans les gaz sont de natures bien différentes. En l'absence de champ ou dans un champ faible, on trouve des ions positifs et négatifs; dans un champ plus élevé, où la vitesse de ces centres est déjà notable, on ne trouve plus que des électrons (charge négative) et des ions positifs

» L'électron est une particule d'électricité complètement dépourvue de tout support matériel ; il est absolument universel, c'est-à-dire que, quel que soit le corps dont il est issu, il est toujours semblable à lui-même, sans aucune individualité chimique.

» Il n'est absolument caractérisé que par sa charge négative de $4,7 \cdot 10^{-10}$ U. E. S.

» C'est la plus petite charge électrique que l'on puisse ajouter ou retirer à un corps.

» Son diamètre est de l'ordre de 10^{-12} cm ; par suite, il est extrêmement mobile.

» Quand cet électron est à peu près immobile ou seulement animé d'une faible vitesse dans un champ faible, il s'adjoint une ou plusieurs molécules gazeuses et devient alors ion négatif. L'ion négatif a, bien entendu, l'individualité chimique du corps dont il a pris les molécules ; il a la même charge que l'électron, et une masse et une mobilité variables suivant le nombre de molécules dont il est formé.

» Si l'électron est, au contraire, animé d'une vitesse notable, il reste isolé, même au sein d'un gaz à assez haute pression ; il semble que sa vitesse ne lui permette pas de capter de molécules.

» L'ion positif est toujours formé d'une molécule privée d'un électron. La masse est donc variable avec celle de la molécule du corps qui l'a produit. La charge est égale et de signe contraire à celle de l'électron. Son diamètre est de l'ordre de 10^{-8} cm.

» Il est donc beaucoup plus gros que l'électron. Pour mieux fixer les idées, si l'on représente l'électron par une tête d'épingle, la molécule devra être représentée par une boule de 10 mètres de diamètre, sensiblement de la hauteur d'une maison de quatre étages. Il est naturellement moins mobile que l'électron.

» Il est possible maintenant, avec les considérations précédentes, d'expliquer les phénomènes qui se manifestent quand la décharge électrique passe à travers un gaz.

» Lorsqu'une différence de potentiel est établie entre les deux électrodes, les ions spontanés que l'on rencontre toujours dans les gaz se rendent à la cathode ou à l'anode, suivant le sens de la charge. Mais, si la différence de potentiel est suffisante, les charges prendront une vitesse telle qu'elles engendreront à leur tour des ions par le mécanisme suivant dit ionisation par choc. Quand un ion animé d'une certaine vitesse rencontre une molécule gazeuse, il arrive parfois qu'il en détache un des électrons constitu-

tifs de l'atome, qui forme une charge négative, le restant de la molécule formant un ion positif.

» Ces nouvelles charges seront à leur tour accélérées par le champ électrique et pourront, elles aussi, donner naissance à d'autres charges en choquant d'autres molécules neutres, et ainsi de suite jusqu'à obtenir un courant intense.

» Dans un tube cylindrique de verre, muni de deux électrodes, ce premier stade de la décharge présente l'aspect suivant. La première modification visible (fig. 2) est un élargissement considérable de l'étincelle, avec diminution corrélative de la luminosité. Cette étincelle élargie P, ou lumière positive, semble partir de l'électrode + et s'arrêter brusquement du côté de l'électrode —. A ce stade, il est fort probable que l'ionisation par choc est en majeure partie due aux électrons, car la différence de potentiel et le champ sont faibles, et la pression forte, de sorte que, seuls, les électrons acquièrent une vitesse suffisante pour ioniser le gaz.

Fig. 2.

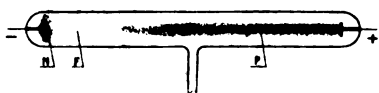


Fig. 3.



Fig. 2 et 3. — Aspects de la décharge dans un tube à gaz raréfié : à gauche, la pression du gaz correspond à 1 cm de mercure environ ; à droite, la pression est bien inférieure à 1 cm de mercure. N, tueur négative ; P, tueur positive ; F, espace obscur de Faraday ; H, espace obscur de Hittorf.

» Cependant, la pression (1 cm de mercure) est déjà suffisamment basse pour que les ions positifs formés puissent se rendre autour de la cathode où ils s'accumulent par suite de leur faible mobilité. Leur présence donne lieu à une charge électrique importante résultant de leur accumulation ; c'est cette perturbation du champ, qui serait à peu près uniforme sans cela, qui change l'allure des phénomènes à la cathode.

» En effet, sous l'action du champ plus intense qui règne devant la cathode, les électrons produits par l'ionisation par choc, en cet endroit sont vivement repoussés par la cathode et prennent une vitesse déjà considérable ; c'est là la première manifestation de l'existence des rayons cathodiques ou faisceau cathodique. Ce sont ces rayons qui, en agissant sur la lumière positive, la font disparaître, en créant la coupure F que l'on voit sur la figure, et qui porte le nom d'espace obscur de Faraday. Il est facile de

montrer l'exactitude de cette assertion en déviant le faisceau cathodique au moyen d'un champ magnétique. Dès que le faisceau fortement incurvé vers la paroi, où il excite la fluorescence du verre, ne tombe plus sur la lumière positive, on voit celle-ci s'allonger comme si elle cherchait à rejoindre la cathode. L'espace obscur de Faraday est donc le témoin de l'existence du faisceau cathodique.

» Dans cette même région, on aperçoit encore une lueur N qui entoure l'électrode négative, elle porte, pour cette raison, le nom de lueur négative.

» Si l'on diminue encore la pression, l'espace obscur de Faraday s'éloigne de plus en plus (fig. 3), montrant que les rayons cathodiques ont un parcours de plus en plus grand, et, en même temps, on voit apparaître un nouvel espace sombre H, dit espace sombre de Hittorf, entre la lueur négative et l'électrode.

» A ce stade, un phénomène nouveau commence à prendre la prépondérance sur les anciens. Jusqu'ici, les électrons du faisceau cathodique étaient extraits des molécules gazeuses, par le choc des charges électriques en mouvement rapide, mais, par suite de l'abaissement de la pression, les chocs se font plus rares ; d'autre part, les ions positifs s'accumulent davantage autour de la cathode, et les électrons produits ne peuvent plus arriver à cette électrode où les ions positifs accumulés les neutralisent. Mais, par contre, dans ce champ intense, les ions positifs prennent une vitesse considérable et viennent frapper la cathode qui, sous l'action de ces chocs, émet des électrons et s'échauffe. C'est à ces chocs d'ions positifs qu'est due la gaine lumineuse adhérente à la cathode, et c'est désormais de cette lueur que partira le faisceau cathodique. Ce courant d'ions positifs en mouvement rapide vers la cathode (leur vitesse peut atteindre 3 600 km:s) a reçu le nom d'afflux positif. Il est absolument indispensable à la formation des électrons du faisceau cathodique, mais, toutefois, il n'est pas indispensable à la décharge ; tout autre moyen produisant des électrons à la cathode conduirait au même effet.

» On peut montrer facilement le rôle important de l'afflux cathodique. Cet afflux provient des régions voisines de la cathode ; exactement, de tout le volume occupé par l'espace obscur de Hittorf. Si, donc, on réduit autant que possible le volume de l'enceinte en avant de la cathode, où se développe l'espace obscur de Hittorf, on réduira aussi l'afflux cathodique ; et le faisceau

cathodique ne pouvant plus ou presque plus se former faute d'électrons, la décharge s'arrêtera ou diminuera fortement. On obtient facilement ce résultat en logeant une des électrodes au fond d'un tube étroit (voir fig. 4). Quant à l'autre, sa position est en principe indifférente, mais, pour d'autres raisons, on fait exactement le contraire, c'est-à-dire qu'on la dispose au milieu d'un large espace. L'appareil ainsi constitué présente une forte dyssymétrie. Si on relie la petite électrode au pôle négatif de la source de courant, le volume de l'espace sombre, réduit à sa plus simple expression, ne fournit qu'un maigre afflux, qui, de plus, éprouve de grandes difficultés à atteindre l'électrode engainée par suite de la charge positive des parois. Aussi, il ne se forme ni électrons ni faisceau cathodique et aucun courant ne passe, bien que la tension puisse être assez considérable. Si, maintenant, on relie

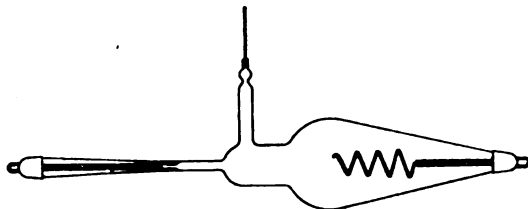


Fig. 4. — Soupape Villard à décharge ionique et électrodes dyssymétriques munie d'un osmorégulateur.

la grande électrode au pôle négatif de la source du courant, un afflux cathodique abondant émanant de toute la large région environnant l'électrode va venir la frapper ; un faisceau cathodique intense se formera et la décharge s'effectuera sans difficulté. Tandis que tout à l'heure, même avec une tension très élevée, il ne passait aucun courant sensible, le courant peut atteindre maintenant 100 milliampères avec une différence de potentiel négligeable.

» Cet ensemble constitue donc une véritable soupape électrique et peut servir à redresser un courant électrique de quelques milliers de volts de tension.

» Cet appareil, qui a été imaginé par M. Villard, nous fournit donc la preuve de l'origine de l'afflux cathodique. Voici maintenant une autre soupape basée sur un principe analogue, mais dans laquelle on laisse un large espace autour des deux électrodes et on arrête l'afflux cathodique par action électrostatique.

» Les deux électrodes ont cette fois des surfaces très développées (fig. 5) ; l'une d'elles est logée dans un appendice qui l'enserme étroitement, ne laissant libre que l'une de ses faces. Vis-à-vis de cette face libre et très près, est disposée l'autre électrode, contenue dans un ballon. Par suite de cette disposition, les deux faces en regard ne pourront ni l'une ni l'autre recevoir d'afflux cathodique, car, tandis que l'une est négative, l'autre étant positive repousse énergiquement l'afflux. L'électrode enserrée qui ne possède que cette face libre ne pourra donc jamais fonctionner comme cathode, tandis que l'autre électrode pourra très bien recevoir l'afflux cathodique sur toute sa surface éloignée de l'autre électrode et soustraite, par conséquent, à son action répulsive ; elle fonctionnera donc facilement comme cathode.

» Tandis que l'appareil précédent nous a fourni la preuve de

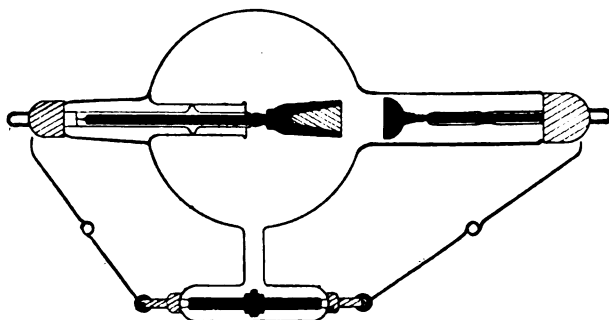


Fig. 5. — Soupape Pilon à décharge ionique, à régulateur par étincelle.

l'origine du faisceau, celui-ci nous fournit la preuve de la charge positive de cet afflux, puisqu'une électrode positive le repousse.

» Revenons maintenant à notre tube de décharge. Si l'on continue à diminuer la pression, l'espace obscur de Faraday reculera encore, puis les rayons cathodiques ayant maintenant un long parcours et atteignant l'autre électrode, la colonne positive disparaîtra complètement, bien que rien d'autre ne s'oppose à sa formation, comme on peut le voir en déviant le faisceau cathodique par un aimant. Puis l'espace sombre de Hittorf augmente aussi, de plus en plus, en perdant de sa netteté. Enfin, les rayons cathodiques produits dans un champ toujours croissant prennent une vitesse d'autant plus considérable, que les molécules du gaz ambiant, très raréfié, n'apportent plus beaucoup d'obstacles à leur propagation.

» Dans cet état, les électrons qui forment ces rayons cathodiques atteignent de très grandes vitesses, et c'est donc l'une de ces conditions que l'on doit réaliser, pour produire des rayons X.

» En diminuant encore la pression, il arrivera évidemment un moment où la décharge s'arrêtera, faute de molécules pour produire les ions positifs de l'afflux cathodique. Il n'y aura donc, par conséquent, plus de rayons cathodiques, et la décharge s'arrêtera.

» Dans cet état, l'enceinte vidée constitue une résistance pratiquement infranchissable par le courant électrique ; nous pouvons actuellement produire des espaces si bien vidés qu'aucune décharge appréciable ne peut passer, même avec des différences de potentiel de 200 kilovolts.

» Trois points sont particulièrement importants à retenir et à analyser, pour se faire une opinion sur le mécanisme de la décharge.

» Nous avons vu, en effet, que l'on pouvait l'entraver de trois façons différentes :

- » a) En extrayant la majeure partie des gaz ;
- » b) En diminuant le volume de l'enceinte devant la cathode ;
- » c) En disposant un corps chargé positivement près de l'électrode négative.

» De la première constatation, il faut déduire qu'une action est due à la présence du gaz. De la seconde, que l'effet a lieu au voisinage immédiat de la cathode. De la troisième, enfin, qu'il s'agit de charges positives, puisqu'elles sont repoussées par une électrode positive. Mais puisque, d'autre part, la présence du gaz est nécessaire, il s'agit évidemment d'ions, et en vertu de la remarque précédente, d'ions positifs. Ainsi se justifie l'hypothèse de l'afflux positif que j'ai employée, pour expliquer la formation du faisceau cathodique.

» 2° *Décharge électronique.* — Lorsque la pression devient trop basse pour que l'afflux cathodique puisse exister d'une façon sensible, la décharge s'arrête, mais nous venons de voir que cela n'implique nullement que les espaces à basse pression soient moins aptes à se laisser traverser par un courant ; il y manque simplement les agents vecteurs indispensables, c'est-à-dire les électrons cathodiques. Si l'on en produit à la cathode, par un moyen autre que l'afflux cathodique, incompatible avec ces basses pressions, la

décharge se rétablira. Le plus simple de ces moyens et le seul à retenir pour le but que nous avons en vue est l'échauffement.

Quand on porte un corps refractaire au rouge, il s'échappe des électrons de sa surface. Le phénomène a été découvert par Edison, puis étudié par Richardson, qui en donna la loi, et par Langmuir, qui le dégagea d'autres phénomènes accessoires masquant sa simplicité, en réalisant l'expérience sous pression extrêmement basse.

» Prenons donc une enceinte complètement vidée. Ce terme est cependant relatif, et c'est pourquoi j'utilise de préférence l'expression « basse pression » ; disons donc, pour mieux fixer les idées, que nous considérons une pression comme très basse, lorsqu'elle ne dépasse pas 10^{-6} mm de mercure. Dans ces conditions, il y a encore quelques millions de molécules par centimètre cube ;

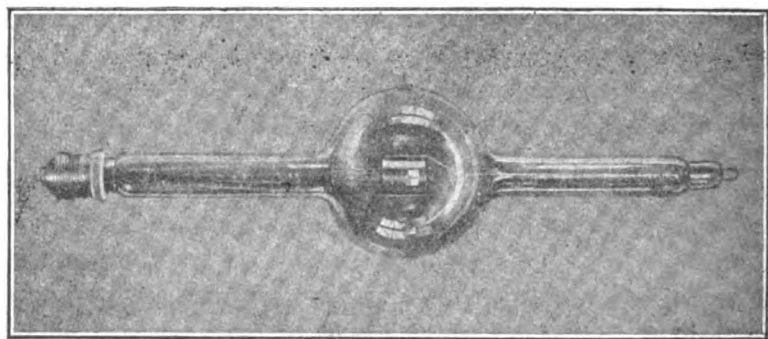


Fig. 6. — Schéma d'une ampoule à décharge électronique, spécialement établie pour avoir une forte dyssymétrie (Kénotron).

c'est encore beaucoup, mais c'est beaucoup moins qu'à la pression atmosphérique où il y en a mille milliards de fois plus. Disposons à l'intérieur deux électrodes, l'une formée d'un cylindre métallique, placé au milieu du ballon ; l'autre, formée d'un filament supporté par des armatures métalliques, placé au milieu de l'axe du cylindre et relié à l'extérieur par une double connexion, comme dans les lampes à incandescence (fig. 6).

» Le filament étant froid et relié au pôle négatif, si l'on applique une différence de potentiel entre les deux extrémités de l'appareil, aucun courant ne passe, même si la tension est considérable. Dès que le filament est chauffé, la décharge s'établit ; un milliampermètre placé dans le circuit indique le passage d'un

courant, et la tension nécessaire pour faire passer ce courant n'est plus que de quelques centaines de volts. Aucun phénomène lumineux ne signale le passage de la décharge, car il n'y a plus de gaz ou si peu que l'ionisation est absolument inappréciable, même avec des moyens sensibles. Nous assistons donc à un transport d'électricité à travers le vide et sans aucun support matériel. Cette translation ne demande, d'ailleurs, pas plus d'énergie que s'il y avait un gaz. Dans le cas présent, une différence de potentiel de 1 500 volts suffit à assurer la transmission de 100 milliampères ; cela correspond à une puissance d'une centaine de watts.

» Il est d'ailleurs facile de montrer que les gaz restants n'interviennent pas dans la décharge. On pourrait croire, en effet, que le filament ne fait que faciliter la décharge en agissant sur les gaz par un processus d'ailleurs quelconque. Or, si on relie le filament chauffé au pôle positif, aucun courant ne passe plus. Il faut donc admettre que les gaz ne participent pas à la décharge et que la seule présence d'électrons à la cathode est indispensable et suffisante pour assurer la décharge. L'appareil ainsi réalisé est encore une soupape électrique, mais d'une efficacité beaucoup plus grande que les précédentes ; les espaces vidés sont, en effet, infranchissables, même pour des tensions de 200 kilovolts, tandis que l'on arrive péniblement à faire des soupapes à décharge ionique, résistant à des tensions de 60 kilovolts.

» Les phénomènes internes sont extrêmement simples en comparaison de la complication du processus de la décharge ionique. Les électrons émis par le filament chauffé sont immédiatement entraînés dans le champ vers l'anode, quand le filament est au potentiel négatif. Il se forme ainsi un faisceau cathodique à peu près analogue à celui que nous avons étudié précédemment, mais nous voyons immédiatement qu'il est contrôlable avec la plus grande facilité, puisque le nombre des corpuscules véhiculés ne dépend absolument que de la température du filament ; nous examinerons tout à l'heure cette question plus en détails.

» Quand, au contraire, le filament est porté au potentiel positif, les électrons qui auraient pu en sortir sont immédiatement attirés et rentrent dans l'électrode même qui les a émis ; il n'y a donc plus aucun courant.

» 3° *Le faisceau cathodique.* — Nous allons maintenant examiner le faisceau cathodique, phénomène commun aux deux types de décharge et agent indispensable de la formation des rayons X.

» Nature du faisceau. — Dans les deux modes de décharge, le faisceau est composé d'électrons à grande vitesse. La vitesse des électrons est régie par la valeur de la différence de potentiel aux bornes de l'ampoule. Actuellement, nous fabriquons des appareils susceptibles de supporter des tensions de l'ordre de 200 kV ; dans ce cas, les électrons atteignent une vitesse de $2,65 \cdot 10^{10}$ cm:s, c'est-à-dire un peu plus des 5/6 de la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^{10}$ cm:s).

» Direction et forme. — La direction du faisceau est évidemment celle des lignes de force du champ électrique. Pour des raisons que j'examinerai plus loin, on doit faire en sorte que la décharge électrique fasse converger le faisceau cathodique sur une surface très petite.

» On dit souvent, et cela peut prêter à confusion, que le faisceau cathodique se propage normalement à la cathode; c'est apparemment exact, parce que le champ est lui-même normal à cette surface, mais cette définition a le tort de faire croire que la direction dépend uniquement de la forme de cette électrode. Il est probable que cette définition inexacte provient de ce que la forme du champ dans les ampoules à décharge ionique est assez compliquée et que, cependant, on voit le faisceau cathodique se propager comme si la surface cathodique agissait comme un miroir, envoyant ses rayons sur le point de convergence choisi. Cela peut, en effet, paraître d'autant plus plausible que ce point de convergence n'est pas nécessairement l'anode et que, dans ces conditions, il n'y a pas de raison que des lignes de force y aboutissent. Cette anomalie n'est qu'apparente, les lignes de force vont bien de la cathode à l'anode en quelque point que celle-ci se trouve, mais il faut se rappeler que le champ n'est pas distribué uniformément, et qu'il n'est intense que près de la cathode où les lignes de force sont évidemment normales par suite de l'énorme charge positive qui se trouve juste devant elles et qui forme, en quelque sorte, une anode fictive. Les électrons cathodiques seront donc lancés suivant ces directions à une vitesse énorme, si bien que le faible champ électrique du reste de l'ampoule n'aura qu'une influence négligeable, et que les rayons se propageront, malgré lui, dans leur direction primitive.

» Dans les ampoules à décharge électronique, rien de semblable ne se produit, et l'on doit obligatoirement donner au champ une forme convergente, ce qu'on obtient par la disposition et la forme des électrodes.

» **Propagation.** — Dans la décharge ionique, le faisceau se propage à travers un gaz raréfié (pression correspondant à 0,01 mm de mercure), et les collisions entre ses électrons et les molécules gazeuses ralentissent une partie du faisceau, si bien que, même avec une différence de potentiel constante, le faisceau est hétérogène, c'est-à-dire formé d'électrons de vitesses différentes.

» Dans la décharge électronique, le faisceau se propage dans un milieu pratiquement privé de matière (pression correspondant à 10^{-6} mm de mercure) ; les collisions sont infiniment rares, puisqu'on ne peut constater l'ionisation qui en résulterait. Aussi, le faisceau produit par une différence de potentiel constante est homogène, tous ses électrons ont la même vitesse.

» **4° Arrêt du faisceau cathodique.** — Nous connaissons donc maintenant le moyen de produire un faisceau cathodique et de le diriger. Pour transformer l'énergie cinétique qu'il contient en rayons X, il faut arrêter ses corpuscules aussi brusquement que possible. Le moyen est simple, il suffit de mettre sur leur passage un obstacle matériel ; mais, malheureusement, ce moyen n'est pas aussi efficace qu'il est simple.

» Cet obstacle matériel s'appelle anticathode par suite de sa position, qui est opposée à la cathode.

» Pour se rendre compte de ce qui va se passer, il importe de considérer les grandeurs relatives des éléments en présence.

» J'ai dit que, si l'on représentait l'électron par une tête d'épingle, l'atome devrait être représenté par une sphère de dix mètres de diamètre.

» La matière la mieux polie est donc, à cette échelle, une agglomération de sphères de dix mètres de diamètre rangées l'une à côté de l'autre. La surface extérieure, bien que polie, n'est tout au plus qu'un plan tangent à toutes les sphères superficielles. Les atomes superficiels ne peuvent, en effet, être coupés ou usés par le procédé de polissage, puisqu'ils n'auraient plus la même espèce chimique, et on sait que cela est impossible, tout au moins par ce moyen, car on réaliserait ainsi une véritable transmutation. On doit donc admettre que la surface extérieure d'un corps est rugueuse et caverneuse, car les sphères atomiques sont tout au plus tangentes entre elles; il est même certain qu'elles ne se touchent pas. Ce n'est pas tout ; la sphère atomique n'est pas entièrement composée de matière, ce n'est seulement qu'à son centre ou noyau qu'elle se trouve concentrée, la région extérieure étant simple-

ment celle où gravitent des électrons dits électrons atomiques, comme des planètes autour d'un soleil. On voit donc combien la matière d'une substance est chose rare pour l'électron incident, et l'hypothèse la plus probable que l'on puisse faire, sur sa rencontre avec la matière, est que sa petite sphère de 1 mm a bien plus de chances de passer dans les espaces interatomiques que de rencontrer la matière du noyau. Mais, toutefois, en passant si près des atomes, tandis qu'il pénètre dans les espaces interatomiques, il subit des ralentissements et des déviations importants. La seconde hypothèse, la plus probable, c'est que l'électron incident a aussi beaucoup de chances de traverser un atome sans toucher ou s'approcher du noyau ; quelques électrons seront bousculés et l'électron incident sera encore ralenti ou dévié. Ces deux catégories d'électrons ralentis pourront avoir un sort final différent. D'abord, ils peuvent épuiser toute leur énergie de la même façon ; ils peuvent aussi ressortir de la matière de l'obstacle en suivant une trajectoire courbe, et constitueront alors une partie des électrons diffusés par l'obstacle ; enfin, ils peuvent subir un arrêt complet, comme nous allons l'expliquer. La dernière hypothèse concernant l'électron incident est qu'il pénètre dans l'atome suivant une direction favorable, et qu'il atteigne le noyau : dans ce cas, il passera de sa pleine vitesse à une vitesse nulle dans un espace extrêmement faible et certainement inférieur au diamètre de l'atome.

» Le résultat de toutes ces accélérations négatives est facile à prévoir. Toutes les petites perturbations, chocs sur électrons, ralentissement dans les espaces intermoléculaires, changement de direction, ne donneront naissance qu'à des ondes de grande longueur, c'est-à-dire des ondes calorifiques ou lumineuses ; c'est, malheureusement, ce qui arrive à la majeure partie des électrons, dont presque toute l'énergie cinétique est transformée en chaleur. Le très petit nombre d'électrons qui sont arrêtés par le noyau des atomes produiront des ondes très courtes, et cela est facile à voir. J'ai montré tout à l'heure (fig. 1), en expliquant le mécanisme probable de la production des rayons X, que l'épaisseur de l'onde δ et sa longueur d'onde étaient quelque chose de comparable ; nous pouvons donc avoir une idée de cette longueur d'onde en nous représentant l'épaisseur de l'onde. Cette épaisseur est donnée par le chemin parcouru par la surface sphérique de l'onde pendant le temps de la perturbation. Supposons donc que

les électrons aient acquis une vitesse de $2,65 \cdot 10^{10}$ cm:s dans un champ de 200 kv, vitesse énorme qui se rapproche tellement de celle de la lumière $3 \cdot 10^{10}$ cm:s que nous pouvons les confondre pour l'approximation que nous avons en vue. Dans ces conditions particulières, il est évident que l'épaisseur de l'onde sera précisément du même ordre de grandeur que le chemin parcouru dans l'atome, puisque l'un et l'autre de ces mouvements se font sensiblement à la même vitesse. Les épaisseurs des ondes ainsi produites seront donc de l'ordre de grandeur du rayon de l'atome, c'est-à-dire : $\lambda = 5 \cdot 10^{-9}$ cm.

» Des considérations précédentes, il résulte donc que, même avec le faisceau cathodique homogène, que produisent les ampoules à décharge électronique, nous aurons des rayons X hétérogènes. En effet, indépendamment des électrons qui arrivent avec toute leur vitesse, on a vu que le plus grand nombre d'entre eux subissaient des ralentissements. Lorsque, à leur tour, ces électrons ralentis choqueront un noyau, ils émettront une onde plus longue, puisqu'ils mettront un temps plus considérable à passer du mouvement à l'arrêt, car il semble que l'arrêt se fasse toujours sur une même distance quelle que soit la vitesse au moment du choc. On conçoit ainsi qu'il puisse se former une émission de rayons X comprenant toute une gamme de longueurs d'onde.

» La fraction d'énergie ainsi transformée en ondes électroniques est environ la 1/1 000 partie de l'énergie contenue dans le faisceau cathodique.

» Il reste encore à examiner ce que deviennent les électrons, qui après avoir frappé l'obstacle interposé, ou anticathode, rebondissent et repartent dans l'espace.

» Deux cas sont à considérer suivant le type de décharge.

» Dans le cas de la décharge ionique, l'espace environnant l'anticathode est rempli d'ions positifs, qui ne peuvent qu'attirer ces électrons errants ; aussi les voit-on s'échapper du point frappé par le faisceau cathodique comme si ce point émettait un nouveau pinceau cathodique ; il en résulte une fluorescence du verre sur tout l'hémisphère situé en avant du plan de l'anticathode.

» Dans le cas de la décharge électronique, l'espace environnant l'anticathode est, au contraire, fortement chargé négativement. Aussi, la trajectoire des électrons qui s'échappent de l'anticathode s'incurve immédiatement et ces électrons vont frapper à nouveau l'arrière de cette masse métallique, en lui faisant émettre des

rayons X, mais aucun de ces électrons n'atteindra le ballon, et c'est pour cela que ces appareils ne présentent aucune fluorescence de la paroi. Cependant, dans l'appendice positif (voir fig. 17), où la charge négative est à peu près nulle, ils peuvent atteindre le verre et exciter sa fluorescence, dans certains cas.

» 5° *Influence du métal de l'anticathode sur les rayons X produits.* — Nous touchons maintenant à une question des plus importantes, pour la construction des tubes à rayons X. Deux éléments sont à considérer dans le faisceau des rayons X : la composition et surtout les composantes de courte longueur d'onde ou « dure », et la qualité émise dans chaque longueur d'onde.

» Tout d'abord, examinons la « qualité ». La plus petite longueur d'onde émise ne dépend absolument que de la vitesse des électrons incidents. Quel que soit l'atome qui sert d'obstacle, l'arrêt se produit toujours dans un même espace, à vitesse du faisceau cathodique égale ; l'accélération négative sera toujours la même, l'épaisseur de l'onde, donc sa longueur d'onde, sera toujours semblable.

» Il ne faudrait pourtant pas conclure que le choix de la substance de l'anticathode soit indifférent. Pour augmenter le plus possible les chances de choc entre un électron et un noyau atomique, il est évident que l'on a intérêt à s'adresser à des éléments à gros noyaux atomiques, donc des métaux. Cependant, au point de vue de l'efficacité, les métaux ne se rangent pas par ordre de densité, ni même de poids atomique, mais suivant des considérations particulières dans le détail desquelles je ne puis entrer. Cette classification, dite périodique, est une modification d'une classification déjà donnée, il y a longtemps, par Mendéléef, et d'ailleurs basée sur d'autres considérations. Les éléments s'y trouvent classés suivant un ordre qui est précisément celui de leur efficacité comme anticathode et on désigne cet ordre par un nombre, dit nombre atomique.

» Théoriquement, on a évidemment intérêt à choisir l'élément possédant le nombre atomique le plus grand, mais des considérations pratiques interviennent pour limiter ce choix. Le chiffre de 0,001 donné précédemment pour le rendement, a été déterminé avec des anticathodes choisies d'après ces considérations.

6° *Régulation de la longueur d'onde moyenne émise par les ampoules.* — Les différentes applications des rayons X nécessitent

l'emploi de rayons de longueurs d'onde différentes. Nous venons de voir que, toutes choses égales, la longueur d'onde minimum ne dépendait que de la vitesse des rayons cathodiques. Nous savons, d'autre part, que cette vitesse dépend, en fin de compte, de la différence de potentiel motrice ; il faudra donc faire varier cette différence de potentiel pour obtenir la longueur d'onde désirée. Je n'ai parlé jusqu'ici que de la plus petite longueur d'onde émise, mais, pratiquement, ce n'est pas seulement cette radiation que l'on utilise, car elle est à la fois de petite longueur d'onde et de très petite intensité.

» Pour avoir une intensité notable, on est conduit à utiliser non pas une émission de longueur d'onde unique, mais toute une série de radiations de longueurs d'onde insensiblement croissantes depuis le minimum possible à la différence de potentiel considérée. C'est donc, en réalité, sur toute cette gamme, que le réglage portera et c'est ainsi qu'il faudra comprendre désormais l'utilisation des ampoules radiogènes. Pour la commodité du langage, on parle souvent de longueur d'onde moyenne, ce terme n'exprime pas d'autre idée précise que celle que je viens de définir.

» Les moyens de réglage sont différents, suivant le mode de décharge.

» Dans les appareils à décharge ionique, on utilise toujours un générateur à haut potentiel, à forte chute de tension. C'est-à-dire que la différence de potentiel aux bornes d'alimentation diminue rapidement avec l'intensité. Cette façon de procéder est rendue nécessaire par l'instabilité de régime des ampoules à décharge ionique. La tension aux bornes de l'ampoule, pour une intensité constante, sera donc déterminée par la résistance apparente de l'enceinte vidée. Pour l'amener à la valeur convenable, le moyen le plus simple est d'en faire varier la pression ; c'est le rôle du régulateur qui, en pratique, ne sert qu'à l'augmenter.

» Dans les appareils à décharge électronique, il est, en général, plus commode d'utiliser des générateurs à haut potentiel à caractéristique de tension droite. Il n'y a, en effet, pas à craindre d'instabilité de régime, puisque l'intensité de la décharge est immuablement fixée par la température de la cathode. Le réglage de la longueur d'onde moyenne est alors des plus simples ; puisque l'intensité ne peut changer quelle que soit la tension, il suffit simplement de faire varier cette dernière, pour que les radiations émises suivent fidèlement les mêmes variations.

CONSTRUCTION DES AMPOULES A RAYONS X

» Nous venons d'examiner rapidement le principe de fonctionnement des ampoules et nous avons vu à quelles conditions elles doivent répondre. Nous allons maintenant voir comment on les réalise.

» 1° DESCRIPTION GÉNÉRALE DE L'AMPOULE. — Quel que soit le mode de décharge employé, on trouve toujours les éléments essentiels suivants :

» a) Une enceinte étanche, électriquement isolante et transparente aux rayons X;

» b) Des électrodes pénétrant dans l'enceinte par des joints absolument étanches;

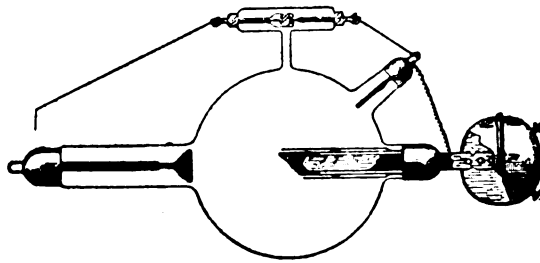


Fig. 7. — Ampoule à rayons X à décharge ionique, à refroidissement par eau de l'anticathode et à régulateur par étincelle.

» c) Un obstacle ou anticathode, pour arrêter le faisceau cathodique ;

» d) Pour les ampoules à décharge ionique, seulement, un régulateur de pression.

» Je vais examiner en détail la fabrication de ces éléments.

» *Electrodes.* — Pour amener le courant dans l'ampoule, on se sert de pièces métalliques de forme spéciale. La configuration des cathodes varie suivant le mode de décharge ; cependant, leurs formes répondent à un but unique, qui est de produire un pinceau convergent de rayons cathodiques. La cathode est évidemment toujours disposée face à la surface d'impact (fig. 7), puisque c'est sur cette surface qu'elle doit projeter ses électrons. La surface d'impact fait partie de l'électrode appelée anticathode parce que située à l'opposé de la cathode. Cette surface est généralement in-

clinée à 45° sur l'axe du faisceau cathodique, dans le but de donner un champ de rayons X plus grand. Il est évident, en effet, que seule la zone comprise entre le plan passant par la surface d'impact et la cathode pourra être utilisée, car, si l'onde naissant au moment de l'arrêt des électrons cathodiques se propage en toutes directions, elle ne pourra pas ou presque pas passer à travers l'anticathode, bloc de métal épais ; on conçoit ainsi facilement le but de l'inclinaison de la surface d'impact. Le pinceau cathodique convergent a toujours une petite section, pour des raisons de commodité de construction de l'anticathode, et surtout à cause des nécessités d'emploi ; par suite, la surface d'impact sera donc aussi petite. Elle est, pratiquement, de l'ordre du centimètre carré. L'anticathode est toujours reliée à la borne positive de la source de courant à haute tension ; cela n'est pas absolument nécessaire, mais c'est ainsi que l'on obtient le meilleur fonctionnement. L'anticathode jouant le rôle d'anode, il n'est, par contre, pas non plus nécessaire d'avoir une autre électrode pour l'entrée du courant ; aussi certains tubes n'en possèdent pas (tous les tubes à décharge électronique) ; d'autres, au contraire, en sont pourvus (la plupart des tubes à décharge ionique).

» Les métaux, comme la plupart des autres substances, d'ailleurs, sont susceptibles de laisser échapper des gaz condensés à leur surface, occlus dans leurs pores, dissous ou combinés dans leur masse. Toutefois, nous savons par de nombreuses vérifications qu'un métal homogène ne peut guère émettre que les gaz qui sont très près de sa surface ; autrement dit, les métaux ne sont poreux que sous très faible épaisseur.

» Réciproquement, un métal libéré des gaz qu'il contenait peut absorber à nouveau, mais faiblement, les gaz ambiants. Le processus d'émission ou d'absorption est sous la dépendance de la température ; il y a émission de gaz quand la température augmente et absorption quand elle diminue.

» Dans certaines conditions physiques, le métal peut aussi se désagréger en se pulvérisant : il présente alors une surface d'absorption énorme et s'empare rapidement des gaz ambiants. La pulvérisation se produit surtout lorsque les métaux sont portés à un potentiel négatif en présence de certains gaz. L'aluminium, par exemple, se pulvérise rapidement dans la vapeur de mercure, mais reste remarquablement inerte dans l'air. Il faut éviter ces phénomènes, qui, dans les ampoules à décharge ionique, font varier

la pression et dans tous les cas rendent conductrices la paroi où ils se déposent, ce qui amène souvent des perturbations du fonctionnement.

» Suivant le type de décharge utilisé, il faudra constituer ces électrodes différemment ; aussi, j'examinerai, pour chaque électrode, le mode de construction afférent à chaque système d'ampoule.

» 1° *Cathode*. — Ampoule à décharge ionique. — La cathode est formée d'une cupule métallique portée par une longue tige, comme le montre la figure 8.

» Cette pièce étant constamment portée à un potentiel négatif, est particulièrement sujette à se pulvériser ; aussi, pour éviter cet inconvénient, on la construit en aluminium. La seule précau-

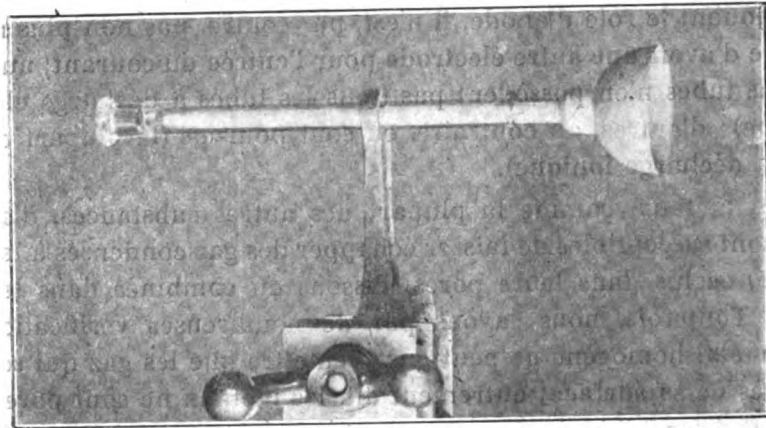


Fig. 8. — Cathode concave en aluminium pour ampoule à rayons X à décharge ionique.

tion à prendre est d'employer l'aluminium très pur et d'éviter soigneusement la présence de vapeur de mercure. La cathode, en recevant l'afflux cathodique, s'échauffe ; il faut donc qu'elle ait une surface de rayonnement suffisante pour ne pas s'échauffer exagérément au régime normal de fonctionnement : c'est pour éviter l'échauffement du support que la masse principale est portée sur une longue tige.

» Ampoule à décharge électronique. — Ici la cathode, comme nous l'avons vu, doit pouvoir produire elle-même des électrons. Elle est formée d'un filament de tungstène roulé en spirale, et enfermé dans une pièce de forme spéciale (fig. 9). Le but de cette

enveloppe, outre celui de servir de support, est de limiter la production des électrons à une direction déterminée, et de donner au champ électrique une forme convenable pour obtenir l'indispensable concentration du faisceau sur l'anticathode. Cette enveloppe, pièce de concentration, comme nous l'appelons couramment, est faite en molybdène; elle est supportée par deux petites tiges également en molybdène, fixées sur une douille ressort que l'on forcera sur un support en verre pour la maintenir en position convenable. L'une des extrémités du filament est fixée après la pièce de concentration, l'autre est supportée par une troisième tige de molybdène isolée de la masse métallique, afin de pouvoir servir de conducteur pour amener le courant de chauffage. Il faut remarquer que la pièce principale et son filament sont soutenus

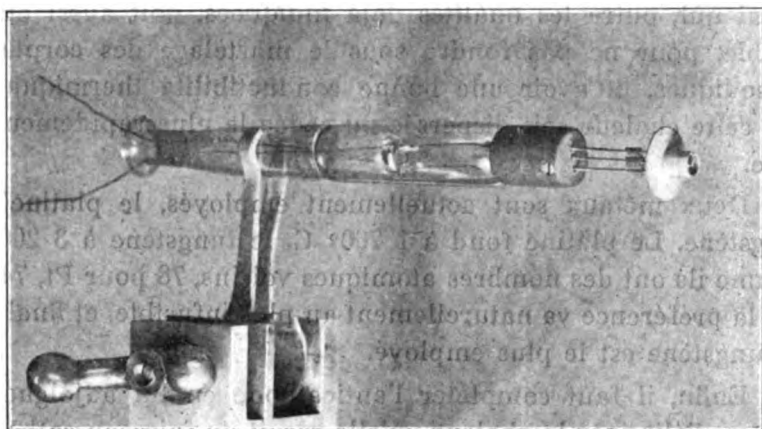


Fig. 9. — Cathode à filament de tungstène pour ampoule à décharge électronique.

par des supports filiformes et sont constitués par des métaux infusibles : nous verrons pourquoi tout à l'heure.

» Il est très important que la résistance électrique et la disposition des spirales de tungstène soient vérifiées avant la construction de l'ampoule, pour éviter les déchets de fabrication provenant d'une défectuosité de cette pièce. Il faut, pour cela, porter le filament au rouge blanc, ce qui donne en même temps l'avantage de contrôler la continuité et le bon isolement du circuit électrique. Bien entendu, cet essai ne peut se faire dans l'air, le tungstène serait immédiatement brûlé : aussi, on enferme le filament et sa monture dans un cylindre métallique (voir figure 13), dans le-

quel on fait le vide; puis, on y fait passer un courant électrique, dont on vérifie la tension et l'intensité.

» Anticathode. — L'anticathode est la pièce la plus importante, étant donné son rôle et les multiples conditions auxquelles elle doit satisfaire.

» Tout d'abord, la surface qui reçoit le faisceau cathodique, ou surface d'impact, doit être formée d'un métal à nombre atomique élevé, pour que le rayonnement X soit aussi intense que possible, toutes autres choses égales d'ailleurs.

» D'autre part, le faisceau cathodique, en frappant l'anticathode, lui cède une puissance qui peut atteindre plusieurs hectowatts, et qui n'est répartie que sur la très faible surface du point d'impact, quelques millimètres carrés tout au plus. Il en résulte un échauffement local considérable, ce qui nécessite l'emploi d'un métal qui, outre les qualités déjà indiquées, doit aussi être infusible, pour ne pas fondre sous le martelage des corpuscules cathodiques, et avoir une bonne conductibilité thermique pour que cette chaleur soit dispersée ou cédée le plus rapidement possible.

» Deux métaux sont actuellement employés, le platine et le tungstène. Le platine fond à $1\,700^{\circ}\text{C}$, le tungstène à $3\,200^{\circ}\text{C}$; comme ils ont des nombres atomiques voisins, 78 pour Pt, 74 pour Tu, la préférence va naturellement au plus infusible, et finalement le tungstène est le plus employé.

» Enfin, il faut compléter l'anticathode en lui adjoignant un moyen d'éliminer la chaleur qu'elle reçoit du faisceau cathodique.

» Le procédé le plus simple et le plus ancien consiste à la laisser rayonner sa chaleur à travers le verre de l'ampoule. Ce procédé ne nécessite que de prendre soin de ne suspendre le métal réfractaire que par des pièces métalliques aussi infusibles que lui, ou tout au moins disposées de façon à n'être pas portées à une température incompatible avec leur nature. Ce procédé permet de disperser une quantité considérable d'énergie si la surface de rayonnement est suffisante. On sait que l'énergie dissipée par rayonnement thermique est proportionnelle à la 4^e puissance de la température absolue.

» Malheureusement, ce procédé donne lieu à des phénomènes secondaires qui limitent son emploi dans les tubes à décharge ionique. En effet, lorsque le métal est porté au rouge durant le fonc-

tionnement, il laisse échapper tous les gaz qu'il contient, la pression augmente et le tube « mollit » ; au contraire, lorsque le tube est arrêté, le métal absorbe des gaz en se refroidissant, et lors d'un nouvel emploi il deviendra très difficile d'y faire passer le courant. Il pourra même être tellement « dur » qu'il faudra recourir au régulateur pour le mettre en marche ; lorsque l'anticathode sera devenue rouge, elle dégagera des gaz, et l'ampoule « mollira ». Ces phénomènes sont, à vrai dire, très peu marqués avec les tubes de faible puissance et ne présentent pas beaucoup d'inconvénients.

» Par contre, si l'on veut établir un tube puissant en appliquant ce mode de refroidissement, il faut évidemment augmenter la surface rayonnante du métal porté au rouge. Les phénomènes que nous venons de décrire deviennent, par suite, si importants, qu'il est impossible de maintenir la pression et par suite le régime de l'ampoule à une valeur définie.

» A ces phénomènes dus simplement à l'action superficielle du métal de l'anticathode, il faut ajouter ceux que produisent la pulvérisation. On verra plus loin que l'anticathode n'est pas toujours rigoureusement au potentiel positif ; elle peut parfois devenir nettement négative. On sait que la plupart des métaux se pulvérisent dans ces conditions et le phénomène est grandement accru quand le métal est porté au rouge, si bien que les parois de l'appareil se couvrent rapidement d'un dépôt métallique pulvérulent de surface énorme. Ce dépôt ajoute une action absorbante formidable à celle de la surface de l'anticathode, et son effet est si considérable que l'on peut observer des variations de pression de 1 à 20 en quelques secondes. Il faut ajouter encore que, même si l'on éliminait l'inconvénient de l'absorption, il y aurait encore l'action perturbante du dépôt métallique conducteur. Le champ électrique peut être, en effet, tellement modifié que la décharge ne puisse passer même dans des conditions normales de différence de potentiel et de pression. Ce procédé de refroidissement de l'anticathode ne peut donc être utilisé qu'avec discernement dans les ampoules à décharge ionique. Par contre, il est excellent dans les ampoules à décharge électronique, où la pulvérisation ne se produit pas faute de gaz et servirait même automatiquement à les éliminer si d'aventure il en restait.

» Un autre procédé permet de s'affranchir de cette difficulté, dans la construction des ampoules à décharge ionique et aussi

d'obtenir certains avantages dans les ampoules à décharge électronique.

» Au lieu de laisser rayonner librement la chaleur, on l'élimine par la conductibilité d'un métal, d'un liquide ou d'un gaz hors de l'enceinte de verre.

» Dans les multiples systèmes employés, on retrouve toujours certains éléments communs : en voici quelques-uns qui sont d'ailleurs essentiels. La surface d'impact en platine ou tungstène est enchassée ou soudée dans un bloc métallique, généralement du cuivre, qui, étant maintenu en contact intime avec le métal réfractaire, le refroidit énergiquement. Ce bloc métallique de forme très variée suivant les modèles se prolonge à l'extérieur par une tige métallique très conductrice, ou par un tube de verre ou de

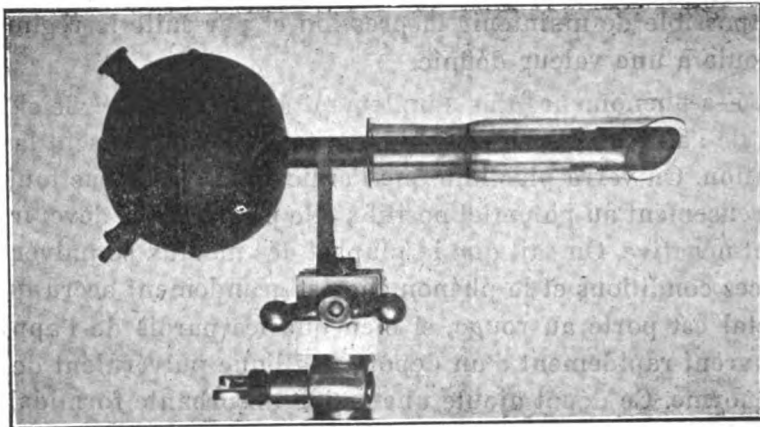


Fig. 10. — Anticathode pour ampoule à décharge ionique, avec boule pour refroidissement par eau.

métal, dans lequel on introduit de l'eau ou un fluide refroidissant quelconque, souvent même une simple circulation d'air.

» DESCRIPTION D'ANTICATHODES, CONSTRUITES D'APRÈS LES PRINCIPES PRÉCÉDENTS. — *Ampoules à décharge ionique.* — Voici, par exemple, un type d'anticathode que nous fabriquons depuis près de dix ans, et qui s'est montré excellent à l'usage. C'est l'anticathode de notre tube OM. Elle est du type à refroidissement par eau et comporte certaines particularités.

» Elle est constituée par un bloc cylindrique de cuivre rouge très pur et très homogène, dans lequel est enchassé une pastille de tungstène (fig. 7 et 10). De l'autre côté, on a foré un trou dans lequel aboutit un tube de cuivre rouge qui se prolonge à l'ex-

térieur de l'ampoule et se termine par un réservoir également en cuivre rouge. Sur l'extrémité du bloc de cuivre du côté foré est soudé un cylindre de métal pouvant se souder au verre ; en l'espèce, c'est le platine que l'on utilise.

» Sur ce cylindre est soudé un tube de verre qui sera réuni à l'enceinte. Le tube métallique, qui relie l'anticathode à la boule, ne touche pas au verre en aucun point ; il est rempli d'eau, ainsi qu'une partie de la boule, de sorte que la chaleur produite sur la pastille de tungstène par le martelage des électrons cathodiques, se transmet au bloc de cuivre, à l'eau du tube métallique, qui entre en circulation par suite de la différence de densité, et vient finalement transmettre la chaleur aux parois de la boule métallique.

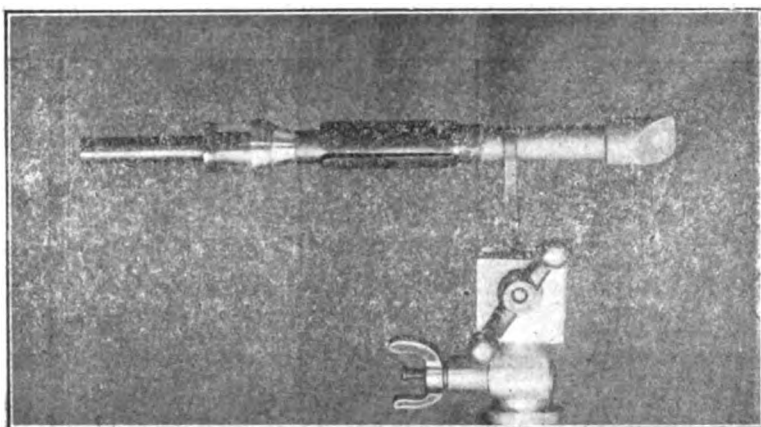


Fig. 11. — Anticathode pour tube Coolidge à radiateur.

» Ce système de refroidissement est excellent, car l'eau ne peut, tout au plus, qu'atteindre 100°C , température d'ébullition, l'anticathode reste donc relativement froide, 200° à 300°C au plus. Grâce au système métallique qui la contient, l'eau ne vient jamais en contact avec le verre qui ne court aucun risque de bris. On peut vider cette eau, remettre de l'eau froide sans aucun danger de casse, ce qui est précieux dans bien des cas. En régime continu, on peut éliminer une puissance de 3 kw ; en régime instantané, 1 à 2 kw.

» *Ampoules à décharge électronique.* — a) L'anticathode utilisée dans le tube Coolidge à radiateur est basée sur un principe analogue : on y trouve encore les mêmes éléments, pastille de tungstène, bloc de cuivre rouge (fig. 11 et 16), mais cette fois le

bloc se prolonge à l'extérieur sous forme d'une tige de grosse section. Le joint entre le verre et le cuivre rouge est fait par l'intermédiaire d'un cône en métal mince, du platine par exemple. L'extrémité de cette tige est pourvue, pendant le fonctionnement, d'un radiateur à ailettes qui disperse dans l'atmosphère la chaleur que lui transmet la tige. Cette anticathode est spécialement utilisée dans les ampoules à décharge électronique, mais elle ferait évidemment aussi un excellent usage dans les ampoules à gaz. En régime continu, cette anticathode peut éliminer une puissance de 1 à 2 kw; en régime très court, 7 à 8 kw.

» b) L'anticathode du tube Coolidge Standard (fig. 12 et 17) est formée par un bloc de tungstène pur forgé, fixé à l'extrémité d'une tige de molybdène pour diminuer la transmission de la chaleur vers le support, le molybdène étant moins conducteur que le tungstène.

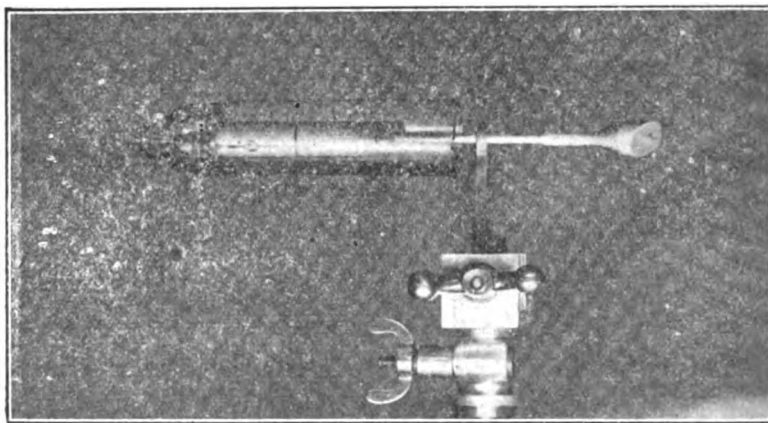


Fig. 12. — Anticathode pour tube Coolidge Standard.

C'est une anticathode à refroidissement par radiation. Fonctionnant dans un vide parfait; il n'y a presque pas à craindre de pulvérisation. On peut impunément la porter à des températures de l'ordre de 2 500° à 3 000° C ; dans ces conditions et moyennant certaines précautions pour refroidir l'enceinte, on peut dépenser dans l'ampoule en régime continu une puissance de 1 kw, et 4 à 5 kw pendant un temps court et en partant de l'anticathode à peu près froide. Cette anticathode est également supportée par une tige filiforme, disposition analogue à celle de la cathode à filament incandescent et dont nous verrons plus loin la raison.

» ANODE. — Seules les ampoules à décharge ionique compren-

nent une anode et, pour en expliquer le but, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails.

» Le courant à haute tension qui alimente les ampoules doit toujours être du même sens, sinon le fonctionnement des électrodes ne serait pas défini, et il est évident qu'il doit l'être, étant donné la forme, la nature et le mode de fonctionnement très différents. Or, le courant utilisé est toujours produit à partir de courant alternatif redressé au moyen d'une des soupapes décrites ou des kénotrons et quelque précaution qu'on prenne, le courant n'est pas absolument unidirectionnel.

» Il en résulte que l'anticathode sera portée à un potentiel négatif et, comme elle est généralement formée d'un métal pulvérisable, elle s'évaporerait facilement, si des précautions spéciales n'étaient prises.

» Les moyens de protection contre cet inconvénient sont de deux ordres :

» 1° Empêcher la décharge négative de passer par l'anticathode ;

» 2° Créer un chemin de moindre résistance pour le courant de sens inverse au sens normal, de façon à ce qu'il soit emprunté de préférence à celui que lui offre l'anticathode. Ces deux moyens sont utilisés concurremment au moyen des artifices suivants.

» Nous savons que, pour que la décharge puisse se produire à partir d'une électrode négative, il faut nécessairement qu'il y ait production d'électrons à cette électrode. Dans le cas de la décharge tonique, ces électrons sont produits par le choc des ions positifs sur le métal. Si l'on empêche ou si, tout au moins, on gêne l'arrivée des ions positifs sur l'électrode, les électrons ne se produiront plus et le courant ne pourra plus passer. On réalise très simplement cette condition en entourant l'anticathode aussi complètement que possible, avec une gaine de verre (voir fig. 11), ne laissant libre que juste la face avant où arrive le faisceau cathodique. Cette gaine constitue un obstacle assez complet et arrête les ions ou « afflux positif » et, de plus, s'oppose très efficacement au dépôt du métal pulvérisé sur les parois de l'ampoule lorsque, malgré sa présence, le métal de l'anticathode très chaude se pulvérise sous l'action d'un courant de sens inverse trop important.

» A ce premier moyen, on ajoute le second qui le complète, en dérivant le courant de sens inverse par un autre chemin, c'est

le rôle de l'anode. Tandis que l'on cherche à augmenter la résistance au passage du courant de sens inverse par l'anticathode, au contraire, on dispose l'anode pour qu'elle reçoive facilement l'afflux positif et qu'il s'y produise facilement les électrons nécessaires au passage de la décharge (fig. 7). Naturellement, l'anode est faite en aluminium, pour qu'elle ne se pulvérise pas, de sorte que le courant de sens inverse, en passant par ce chemin, n'occasionne aucun inconvénient.

» Il ne faudrait pas, cependant, croire que ces deux moyens rendent l'ampoule absolument insensible au courant de sens inverse. Dans les appareillages où il peut prendre naissance, des soupapes ou un kénotron doivent toujours être interposés dans le circuit ; les artifices que comprend le tube doivent simplement servir à empêcher les effets de courant de sens inverse que ne peuvent arrêter les soupapes ou le kénotron, si excellent que soit leur effet protecteur.

» TRAITEMENT DES PIÈCES MÉTALLIQUES. — L'emploi des métaux dans des atmosphères raréfiées impose de grandes sujétions, quant à leur choix, leur pureté, leur homogénéité et leur usinage. Ils sont notamment, comme il a été dit, susceptibles de se pulvériser dans certaines conditions ; or, la moindre trace de métal étranger dans l'aluminium, par exemple, métal réputé réfractaire à cet inconvénient, lui fait perdre toutes ses qualités ; d'autres métaux, comme le cuivre, qui ne présentent ce phénomène que très faiblement, deviennent inutilisables dès que des traces de métaux ou de matières étrangères souillent leur masse ou simplement leur surface. On sait aussi que les métaux ne peuvent guère émettre que les gaz occlus très près de leur surface extérieure, mais il est bien évident que cette propriété ne saurait subsister, si le métal présente des pailles ou plissures, ou une porosité anormale due à un traitement métallurgique defectueux. Si cette homogénéité essentielle s'obtient avec facilité pour le platine, métal de traitement métallurgique facile, parce que inoxydable et presque chimiquement inactif, combien la chose est moins aisée avec le cuivre, le tungstène, le molybdène et l'aluminium qui sont nos éléments généraux de construction. Il m'est impossible d'entrer dans le détail des traitements compliqués que nous devons faire subir à ces métaux avant de les employer, après les avoir choisis minutieusement parmi ce que l'industrie fait de meilleur. J'indiquerai simplement que, lors-

que toutes ces électrodes sont parvenues à leur complet achèvement, après avoir passé par tous les traitements nécessaires à assurer leur homogénéité et leur pureté, elles subissent toutes un traitement spécial, dont voici la raison : La surface des métaux et une faible partie sous-jacente contiennent une quantité si considérable de gaz qu'il serait impossible d'obtenir un fonctionnement à peu près stable de l'ampoule au début de l'extraction des gaz, qui doit toujours se faire à faible pression. Aussi toutes ces électrodes sont-elles placées dans un four électrique à vide (fig.13), où on les chauffe à aussi haute température que le permet leur nature en extrayant les gaz qui se dégagent au moyen d'une pompe puissante. Ainsi traitées, les électrodes refroidies sont retirées du four et introduites le plus rapidement possible dans les ampoules. Il est remarquable que ces électrodes ainsi traitées ne reprennent jamais à l'atmosphère qu'une très minime partie des gaz extraits ; il est cependant désirable d'éviter même cette légère absorption, c'est pourquoi on procède aussi vite que possible, au montage de ces pièces et à l'extraction des gaz.

» Ce traitement a encore comme avantage d'amener les pièces dans un état de propreté absolue, toute matière organique étant réduite à l'état de carbone inoffensif, et pour le constructeur d'ampoules, la matière organique, voilà l'ennemi. Aussi, à la suite de ce traitement, les électrodes ne sont plus touchées avec les mains ; elles sont toujours transportées dans des plateaux émaillés et saisies avec des pinces ; ce n'est pas toujours commode et ce fut l'une des grandes difficultés que nous rencontrâmes que d'imposer cette technique à nos ouvriers.

» RÉGULATEUR DE PRESSION. — C'est un organe qui est particulier aux ampoules à décharge ionique ; en réalité, le régulateur sert généralement à augmenter la pression ; il n'est pas pratique, en effet, de procéder à l'inverse, bien que cela soit fort désirable.

» On peut les diviser en deux classes : régulateurs permettant d'introduire des gaz venant de l'extérieur ; régulateurs libérant le gaz contenu dans une substance enfermée dans l'ampoule.

Première catégorie : Osmorégulateur. — L'osmorégulateur de Villard est le plus ancien et le plus parfait des régulateurs ; il appartient à la première classe. Son principe, des plus ingénieux, est basé sur le fait suivant : lorsqu'une paroi de platine

très mince est chauffée au rouge dans une atmosphère d'hydrogène, ce gaz passe du côté où sa pression propre est la plus faible. Ceci veut dire que l'hydrogène passera d'un côté ou de l'autre

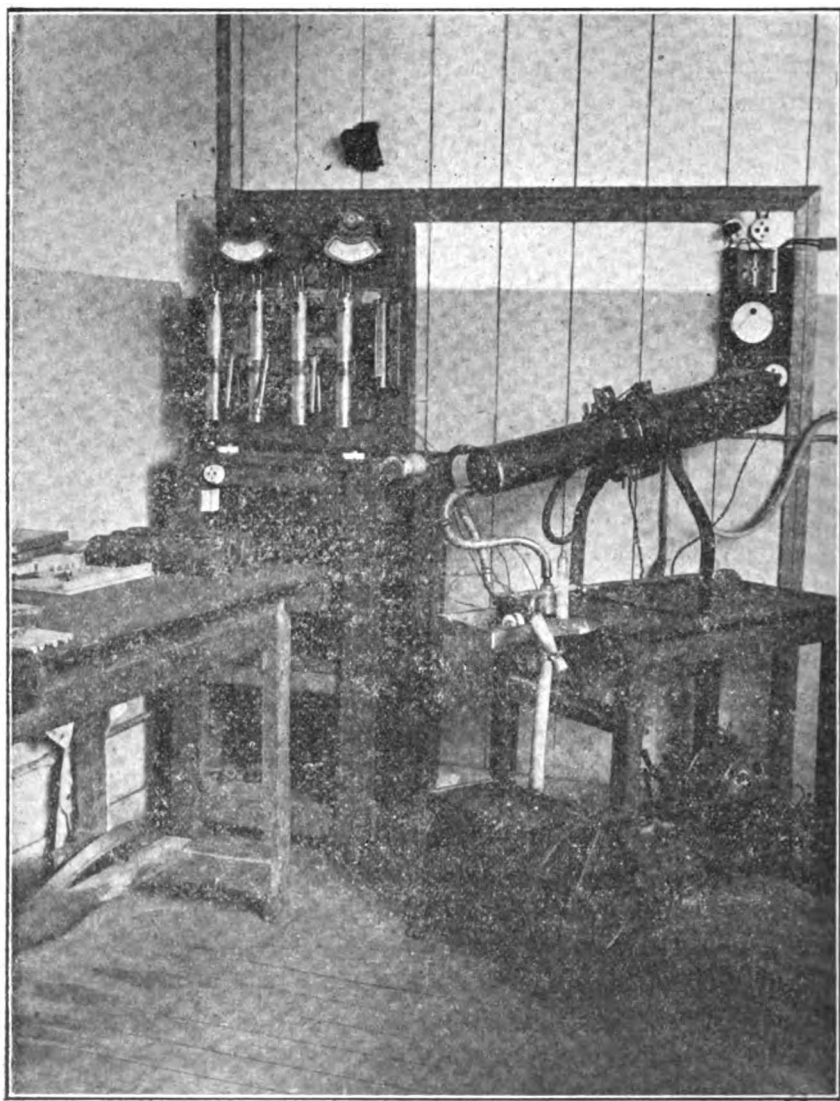


Fig. 13. — Four électrique pour le chauffage des électrodes (à droite) et appareil pour essayer les filaments à basse pression (à gauche).

de la paroi, sans que la pression des autres gaz présents intervienne en quoi que ce soit dans le phénomène. En particulier, si l'on chauffe un tube de platine contenant de l'hydrogène à basse pression, dans une atmosphère d'air à la pression atmos-

phérique, malgré la différence des pressions, l'hydrogène sortira du tube parce que la pression de l'hydrogène est nulle dans l'air qui n'en contient pas. En pratique, on réalise ce régulateur de la façon suivante : Un petit tube de platine ou de palladium est soudé sur un appendice latéral en verre ; quand on désire abaisser la pression, on chauffe simplement ce tube avec une flamme, et quand il est rouge, l'hydrogène de la flamme rentre lentement dans l'appareil. La soupape Villard représentée en figure 4 est munie d'un osmorégulateur. On peut, en principe, faire l'opération inverse, c'est-à-dire faire sortir l'hydrogène de l'ampoule, mais ce n'est pas pratique parce que l'opération est fort lente par suite de la très faible pression des gaz internes. Cependant, l'opération est d'une si remarquable simplicité que je la décrirai. Il suffit d'enfiler sur le petit tube de platine un autre tube métallique plus gros et de chauffer le tout. Le tube de platine est ainsi porté au rouge, dans le petit four ainsi constitué et qui ne contient que de l'air à la pression atmosphérique ; aussi l'hydrogène sort de l'ampoule où sa pression, quoique très faible, est supérieure à celle de l'hydrogène du petit four, puisqu'il n'en contient pas ou presque pas. Malgré sa simplicité et sa sécurité de fonctionnement, ce régulateur est à peu près abandonné, car il a contre lui l'inconvénient de nécessiter la présence d'une flamme, et cela peut être si gênant et si incommode qu'on ne l'emploie plus guère.

» *Régulateur à air.* — Ce type de régulateur appartient aussi à la première classe. Il a été ainsi nommé parce qu'il utilise l'air atmosphérique comme gaz régulateur. C'est une valve hydrostatique dont le liquide est du mercure.

» Le régulateur à air se compose, en principe, d'un orifice relié à l'ampoule, bouché par un corps poreux perméable à l'air et recouvert normalement d'une couche de mercure qui ne peut s'infiltrer à travers les pores, malgré la pression atmosphérique, à cause de sa grande tension superficielle. Si l'on déplace le mercure, l'air passera à travers le bouchon poreux, jusqu'à ce que le mercure ait repris sa place.

» Pratiquement, le régulateur à air est construit de la façon suivante :

» A l'intérieur d'un petit cylindre de verre relié à l'ampoule à rayons X se trouve fixé un manomètre capillaire à air comprimé, dont la branche ouverte traverse la paroi du cylindre de

verre (fig. 14) ; à quelques centimètres de la sortie de la branche ouverte, dans l'enveloppe, un appendice latéral est soudé sur cette branche et renferme le bouchon poreux. Le manomètre contient une quantité de mercure telle qu'il recouvre le bouchon poreux. Si l'on comprime de l'air dans la branche ouverte au moyen d'une petite pompe à piston manœuvrée à la main, le niveau du mercure s'abaisse et le bouchon poreux découvert laisse filtrer un peu d'air. Cet effet cesse aussitôt qu'on laisse le piston de la pompe reprendre sa place sous l'action du ressort dont il est muni.

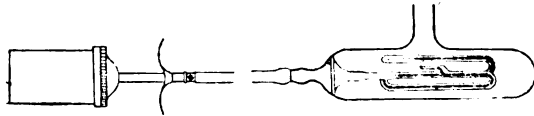


Fig. 14. — Régulateur à air pour ampoules à décharge ionique.

» Pour que cet appareil puisse être mis en toutes positions, soit pendant l'emploi ou pendant un transport, le tube manométrique est choisi très fin, de façon à ce que la tension capillaire empêche le mercure de s'échapper sous l'action de la pesanteur ou d'un choc.

Deuxième catégorie : Régulateur à étincelle. — Ce régulateur appartient à la seconde classe, c'est-à-dire que le gaz est contenu dans une substance placée d'avance dans le tube. Ce nom, assez impropre d'ailleurs, mais consacré par la pratique, vient de ce que l'on dérive une partie du courant principal dans le régulateur par des étincelles, lorsqu'on veut le mettre en action.

» Il est constitué par un corps convenablement choisi serré entre deux électrodes (fig. 5 et 7), le tout contenu dans un appendice cylindrique relié au tube.

» Ce système excessivement robuste s'adapte à tous les tubes sans exception, grâce à la possibilité de choisir une matière dégageant un gaz approprié.

» L'usage de ce régulateur est très simple. Chaque électrode entre lesquelles est serrée la substance est munie d'une antenne mobile (fig. 5 et 7) destinée à dériver une partie du courant parcourant l'ampoule. Pour le faire fonctionner, il suffit d'approcher les antennes mobiles des extrémités de l'ampoule ; comme la résistance apparente du régulateur est beaucoup plus faible que celle de l'ampoule, le courant passe, chauffe la substance et libère du gaz.

» **FABRICATION DE L'ENCEINTE ÉTANCHE (ampoule).** — L'enceinte est faite en verre, et c'est de sa forme généralement sphérique qu'est venu le nom « d'ampoule » à rayons X. Le verre est, évidemment, la substance la plus adéquate pour cet usage. Isolant, étanche, transparent aux rayons X, il a, de plus, l'avantage d'être transparent à la lumière, ce qui permet de voir et de surveiller ce qui se passe pendant le fonctionnement, avantage précieux surtout avec les tubes à décharge ionique. Le verre n'a malheureusement pas que des qualités ; nous verrons plus loin à quelles sujétions entraîne son emploi, mais il est juste d'ajouter qu'en prenant les précautions que j'ai énumérées, la sujétion est seulement pour le constructeur et le seul accident possible entre les mains du radiologiste est le bris, par choc, serrage, compression, échauffement brusque ou trou d'étincelle, la fêlure spontanée étant absolument exceptionnelle.

» La forme de l'enceinte répond à des besoins et conditions précis. Tout d'abord, les seules formes admissibles avec le verre, substance fragile et cassante, sont le cylindre et la sphère ou, plus généralement, les solides de révolution ou une combinaison de ces éléments.

» Ce sont ces formes qui permettent aux ampoules de résister à la pression atmosphérique qui tend à les écraser ; toute forme plane, concave ou autre ne pourrait être adoptée. Il est intéressant de savoir à titre d'indication que le poids total supporté par la paroi d'un tube du fait de la pression atmosphérique, est de plusieurs centaines de kilogrammes. L'aspect bien connu des ampoules (fig. 5, 6, 7, 16), qui se composent toutes d'une sphère portant un certain nombre d'appendices, est dictée par les raisons suivantes :

» Il faut, tout d'abord, que le volume des gaz à basse pression soit aussi grand que possible, dans le but de rendre plus lentes les variations de pression tout en étant contenu dans une enveloppe de faible surface, pour limiter autant que possible le dégagement de gaz par les parois. C'est la sphère qui répond à ces conditions. D'autre part, l'anticathode s'échauffant devra, autant que possible, être tenue éloignée à égale distance des parois ; c'est pourquoi on les met au centre de la sphère. Au point de vue électrique, on sait que les tensions employées sont de l'ordre de 50 000 à 100 000 v et que ces tensions peuvent percer des couches d'air de 25 cm ; il est donc absolument nécessaire que

les points d'entrée du courant dans le tube soient éloignés au moins de 30 cm. C'est pourquoi on munit la sphère d'appendices par l'extrémité desquels sortent les fils conducteurs reliés aux électrodes internes ; les fils reliant ces électrodes à la source de courant haute tension se trouvent ainsi éloignés à une distance suffisante pour que l'étincelle ne puisse éclater entre eux.

» La construction de cette enceinte se fait de la façon suivante. L'ouvrier a, comme matière première, à sa disposition des ballons soufflés à la canne dans une verrerie et des tubes de verre. Son travail consiste à souder, sur le ballon déjà muni

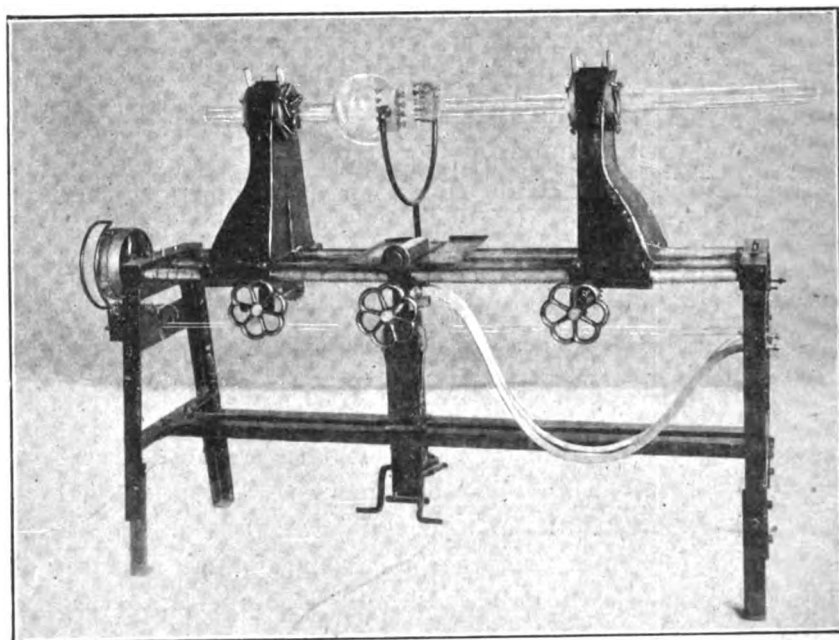


Fig. 15. — Tour permettant de réaliser automatiquement la soudure des divers appendices sur les ampoules à rayons X.

d'un appendice, les autres appendices qui ne peuvent être obtenus en verrerie. Il fixera ensuite les électrodes, et, enfin, le régulateur.

» Ces opérations se faisaient primitivement à la main ; mais, devant la rareté de cette main-d'œuvre très spéciale, nous avons étudié et construit des machines à souffler qui remplacent avantageusement le procédé manuel et, actuellement, la plus grande partie de notre fabrication est faite sur ces machines. C'est une sorte de tour (fig. 15), mais dont les deux poupées mobiles peuvent entraîner les pièces qu'elles reçoivent, d'un mouvement ri-

goureusement synchrone ; elles ont le même rôle que les deux mains de l'ouvrier.

» Chacune de ces poupées reçoit l'une des pièces à souder ensemble ; elles y sont fixées par deux mandrins à trois mâchoires qui centrent automatiquement les pièces en les serrant. L'outil de ce tour particulier est une paire de chalumeaux, fixés classiquement, comme dans le tour à métaux, sur un chariot mobile et commandés par un volant.

» L'opération se déroule, en principe, de la façon suivante : Les parties à souder étant fixées, on met la machine en route en appuyant sur l'une des pédales ; on chauffe d'abord lentement le verre au moyen d'une flamme auxiliaire ; puis, au moyen de chalumeaux, que l'on met en marche en appuyant sur l'autre pédale. On ramollit le verre sur les bords des parties à souder ; en rapprochant ensuite les poupées supports au moyen de leur volant, on presse l'une contre l'autre les parties ramollies, qui adhèrent immédiatement. Ensuite, par nouveau ramollissement, soufflage ou traction, on achève de donner une forme convenable à la pièce.

» Le verre, après tout ce travail, doit être refroidi lentement, sinon il se trempe, c'est-à-dire que les parties refroidies les premières s'opposent au mouvement général de la masse encore molle, et il se crée des tensions internes que le moindre effort, rayures ou choc, libère de leurs entraves provisoires. Il en résulterait des fêlures en apparence inexplicables, mais que nous savons dépister.

» Cependant, le recuit, c'est-à-dire l'échauffement jusqu'au ramollissement, suivi d'un lent refroidissement, n'est pas toujours suffisant pour faire disparaître tout effort interne ; il faut aussi que la forme des appareils satisfasse à certaines conditions, sinon, malgré toutes les précautions prises pour la cuisson, des casses dites « spontanées » apparaissent, indice certain de tensions internes.

» Nous possédons un moyen très pratique pour l'examen de ces tensions du verre. C'est un appareil à lumière polarisée chromatique, qui permet, par simple inspection visuelle de la pièce, de se rendre compte de ses défauts. Il reste évidemment à les corriger, et ce n'est pas le plus facile, mais c'est déjà énorme de pouvoir les connaître et de ne plus travailler avec un aveugle empirisme.

» Pour obtenir une sélection pratique des appareils fabriqués, pour s'assurer de leur étanchéité, de leur solidité, et enfin pour éviter leur altération par absorption de gaz, on fait un vide grossier dans les ampoules sitôt qu'elles sont fabriquées, on les ferme et l'on mesure la pression. Après un certain laps de temps que la pratique nous a enseigné, on vérifie la valeur de la pression ; si elle a augmenté, l'ampoule défectueuse est examinée et réparée ou reconstruite ; sinon, elle est envoyée aux salles de pompage. C'est surtout pendant ce délai d'attente, ce vieillisse-

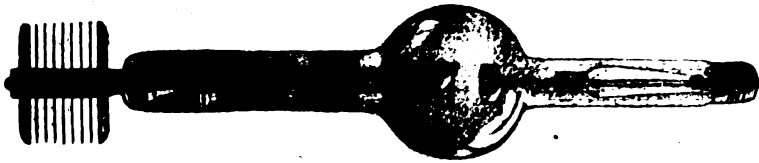


Fig. 16. — Ampoule à rayons X à décharge électronique avec dispositif de refroidissement par ailettes.

ment, que la casse se produit ; elle est malheureusement grande, malgré tous les soins apportés à la construction.

» On pourra voir les formes des principaux tubes construits sur les figures 7, 16 et 17.

» EXTRACTION DES GAZ. — Le but à réaliser est différent, suivant le type d'ampoule ; pour obtenir la décharge ionique, il faut évidemment que l'ampoule contienne des gaz, tandis que, pour la décharge électronique, elle ne doit plus en avoir.

» Cependant, dans un cas comme dans l'autre, l'ampoule doit être menée, pendant l'extraction des gaz, à un régime intense

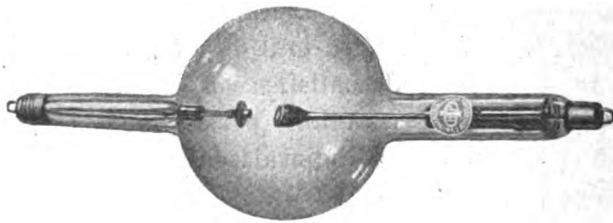


Fig. 17. — Autre modèle d'ampoule à décharge électronique.

très supérieur à celui qu'on lui appliquera pratiquement, de façon à ce qu'aucun dégagement intempestif de gaz ne puisse se produire pendant l'usage.

» On extraira donc une quantité limitée de gaz pour les ampoules à décharge ionique, et la limite sera donnée par les con-

sidérations suivantes : l'ampoule doit pouvoir supporter une certaine puissance en régime continu sans laisser échapper de gaz de ses pièces, mais elle ne doit pas non plus « durcir » trop vite sous l'action de la disparition spontanée des gaz pendant le fonctionnement normal. On arrête l'extraction des gaz quand l'ampoule mise à son régime normal d'utilisation manifeste une très légère tendance à durcir d'elle-même, par fixation de ses gaz internes. La pression résiduelle est alors de l'ordre de 0,01 mm de mercure quand l'ampoule est molle ; elle est déjà dure, c'est-à-dire que la tension peut être de 100 kv à ses bornes quand la pression n'est plus que de 0,001 de mercure.

» Pour les ampoules à décharge électronique, il faut, au contraire, enlever le plus possible les gaz. La puissance dépensée dans l'ampoule sera donc portée à la plus haute valeur compatible avec sa construction, pour que les pièces métalliques soient fortement chauffées. Il est bien évident que l'opération est limitée par l'échauffement du verre, surtout à l'endroit où les électrodes sont fixées. Aussi, bien qu'il soit désirable de porter d'un seul coup toutes les pièces métalliques au rouge, on est obligé pratiquement de ne procéder que par fraction, les parties qui sont immédiatement en contact avec le verre ne pouvant guère être chauffées. C'est pourquoi ces pièces sont toujours fixées par un support filiforme, que j'ai signalé lors de la description des accessoires, et qui présente le double avantage de diminuer la conductibilité thermique et de réduire au minimum la zone de métal où l'action de la chaleur n'a pu provoquer le départ des gaz. C'est aussi pour cette raison que les pièces métalliques sont préalablement vidées au four électrique ; on abaisse ainsi à des proportions négligeables l'émission gazeuse de la partie des pièces qui ne pourra être chauffée pendant le pompage. La pression finale dans ces ampoules est de l'ordre de 10^{-6} mm de mercure, c'est-à-dire du millième de micron.

» Pour provoquer le départ des gaz des pièces où il est fixé, le principal moyen est donc l'échauffement. Le verre mérite une attention particulière, car, étant donné sa fragilité, c'est lui qui est le plus mal vidé, faute de pouvoir le chauffer suffisamment. D'ailleurs, même fondu dans le vide, le verre laisse à nouveau indéfiniment dégager un gaz ou une vapeur dès qu'on le réchauffe suffisamment ; c'est ce qui fait penser qu'il s'agit là d'une tension de vapeur et qu'il est impossible de l'éviter.

Comme le fonctionnement électrique n'échauffe pas ou peu l'enceinte de verre, et aussi pour enlever la plus grande partie des gaz des pièces internes, les ampoules sont tout d'abord enfermées dans une étuve et chauffées aussi haut que possible pendant qu'on y fait le vide. Ce n'est que lorsque la pression est devenue à peu près nulle qu'on laisse refroidir, et que l'on commence à lancer le courant dans chaque ampoule, pour amener progressivement les pièces métalliques à la température la plus élevée possible. Ces opérations sont très longues et la moindre interruption fait perdre non seulement le travail de pompage déjà réalisé, mais aussi les ampoules en pompage, qui doivent être reconstruites. Aussi, pour l'exécution de cette opération délicate, il faut posséder un outillage extrêmement sûr, de façon qu'à l'insécurité inévitable due à la fragilité du verre ne viennent pas s'ajouter des arrêts intempestifs dus à un matériel insuffisant, fragile ou mal étudié. C'est donc avec un soin extrême que nous avons établi notre appareillage si délicat. Nous avons dû fabriquer nous-mêmes nos pompes et autres appareils de pompage, faute de pouvoir trouver dans le commerce des instruments suffisamment robustes pour apporter la sécurité désirée. C'est ainsi que nous sommes devenus constructeurs de pompes à vide, et qu'après avoir été notre unique client, nous sommes devenus le plus petit, la majeure partie de nos pompes étant vendue maintenant aux différentes industries du vide.

» Les deux pompes que nous utilisons concurremment sont basées sur deux principes différents. L'une est une pompe rotative à huile, composée de deux pompes montées en série et noyées dans une huile spéciale dont la tension de vapeur est si basse que la pression limite est de 0,0001 mm de mercure. En partant de la pression atmosphérique, une capacité de 10 litres est amenée à 0,0001 mm de mercure en 7 minutes. Ce résultat est déjà intéressant, mais encore insuffisant, en qualité et quantité ; il nous faut, en effet, des pressions bien plus basses et une vitesse d'extraction plus grande. Aussi cette pompe est-elle toujours accouplée à une pompe de condensation, dont le principe a été indiqué par Langmuir, et dont nous avons construit un modèle métallique démontable, perfectionnement important, car la propreté de ces appareils est de première importance pour leur fonctionnement, et qu'elle ne s'obtient aisément que si l'on peut atteindre tous les organes.

» Dans ces conditions, on réalise facilement des débits d'extraction de l'ordre de 4 000 cm³:s, avec une sécurité que nous avait désapprise l'usage des différentes pompes, même les plus perfectionnées. La pompe à condensation ne comprend aucun organe en mouvement ; une nappe de vapeur de mercure entraîne les gaz à extraire vers l'orifice de sortie, se condense, retourne à la chaudière et repart indéfiniment sous forme de vapeur. Je n'hésite pas à affirmer que le groupe d'extraction ainsi constitué est actuellement ce qui existe de plus parfait pour l'obtention des plus basses pressions. Un simple fait le prouvera ; nous avons actuellement un de ces groupes qui fonctionne depuis 18 mois, sans aucune espèce d'entretien et il n'y a aucune raison pour que cela ne dure pas jusqu'à usure mécanique complète, s'il ne se produit pas d'accident, bris de canalisation, introduction accidentelle d'impuretés dans la pompe, etc.

» TABLES DE POMPAGE. — Chacune d'elles se compose d'un bâti prismatique (fig. 18) supportant les pompes, l'étuve et un écran opaque aux rayons X ; l'étuve et l'écran qui entoure toute la table se font équilibre, étant suspendus au bout de câbles passant sur des poulies fixées à la partie supérieure du bâti.

» Entre les quatre montants du bâti (fig. 19) sont disposés deux plateaux, l'un à hauteur de table, l'autre à ras du sol. Sur le plateau le plus haut sont disposés des isolateurs en quartz et porcelaine qui servent à amener le courant et à supporter les tubes. Sur le plateau inférieur, on voit la pompe primaire à huile, la pompe à condensation et une partie de la canalisation aboutissent aux tubes ; enfin, deux transformateurs 110/15 v, isolés pour 100 kv entre primaire et secondaire, sont également disposés sur ce plateau et servent au chauffage des cathodes incandescentes.

» Pendant le fonctionnement des ampoules, l'écran opaque est baissé de façon à ce que les opérateurs ne puissent recevoir de rayonnement X ; la surveillance des opérations s'exerce au travers de la glace opaque aux rayons X dont il est muni.

» En plus de cette protection contre le rayonnement direct, on se protège contre le rayonnement secondaire qui peut s'échapper au-dessus du premier écran en disposant un deuxième écran, muni également d'une glace opaque, immédiatement devant chaque opérateur, de façon à faire ombre sur lui (fig. 18). Ces procédés de protection semblent parfaits, car je n'ai jamais eu à déplorer le moindre accident. Je

crois, d'ailleurs, que les accidents de ce genre sont dûs à l'imprudence, car j'ai, personnellement, plus de dix années de manipulation continue avec ces rayonnements, réputés dangereux à juste

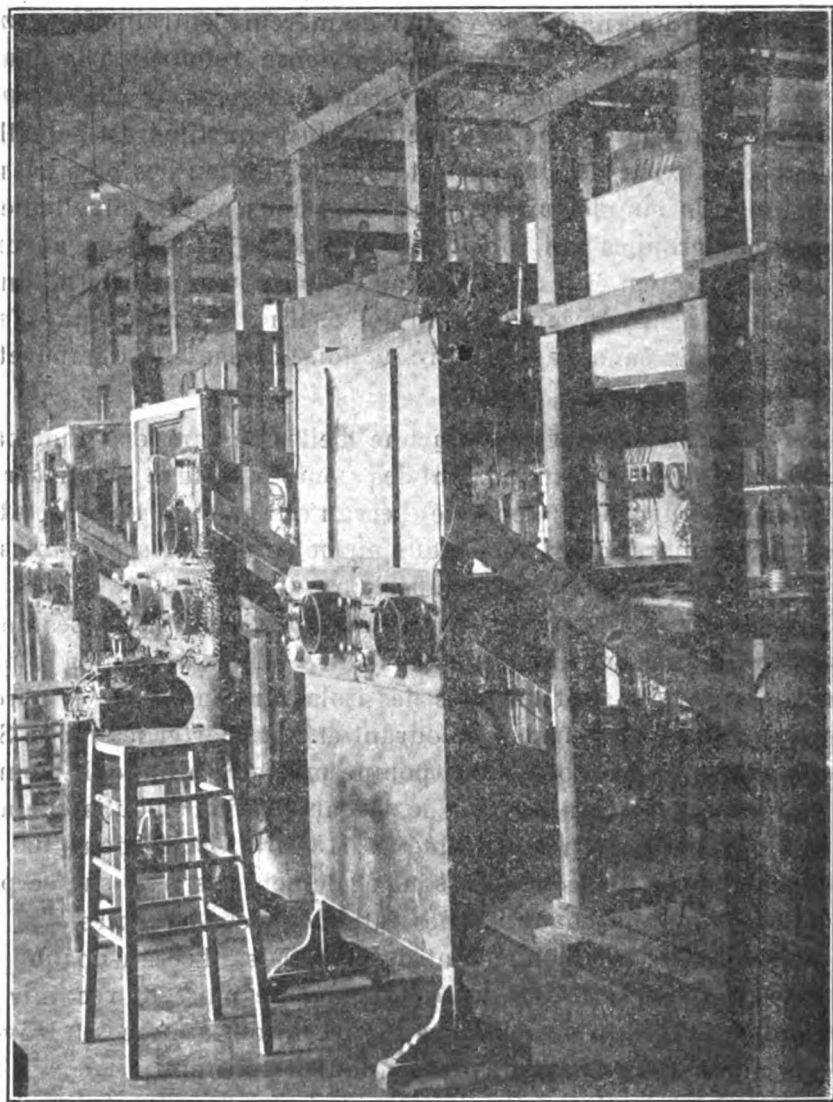


Fig. 18. — Table de pompage pour la préparation des ampoules à rayons X. Vue antérieure.

titre, et je ne présente pas la moindre trace de radiodermite. On n'attrappe pas plus de radiodermite quand on est derrière un écran opaque aux rayons X, que l'on n'attrappe de coup de soleil à l'ombre!

» Pendant le pompage, l'opérateur assis sur un tabouret, ayant à portée de sa main les divers organes de réglage de la tempéra-

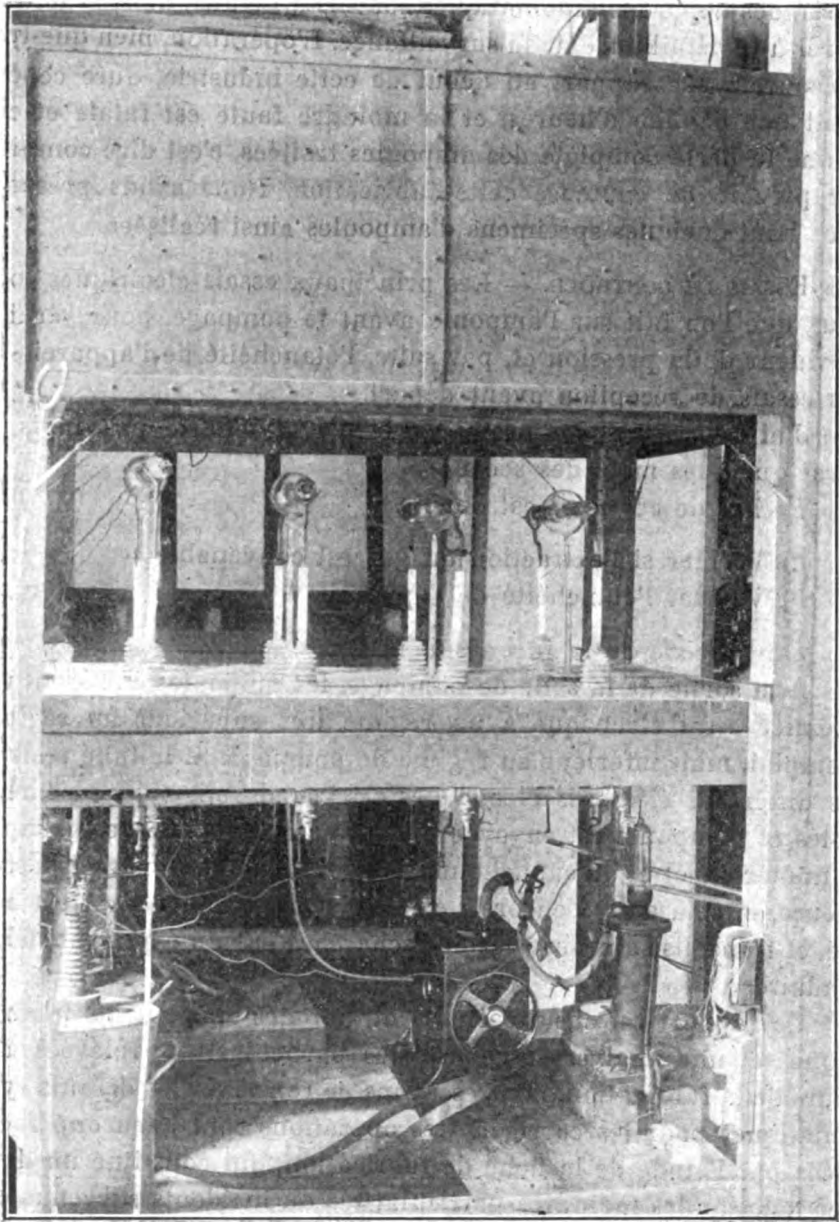


Fig. 19. — Table de pompage pour la préparation des ampoules à rayons X. Vue postérieure.

ture des filaments, de la tension appliquée aux ampoules, du chauffage de la pompe, règle ces éléments en suivant attentive-

ment la marche de l'opération. Les progrès de l'extraction sont faciles à suivre pour un ouvrier entraîné : la seule chose à craindre, c'est que l'attention ne se lasse à force d'être prolongée ; aussi, des appareils automatiques sont-ils à l'étude, dans le but de parer à la défaillance de la surveillance. L'opération, bien que très raccourcie par rapport au début de cette industrie, dure cependant une dizaine d'heures, et la moindre faute est fatale et entraîne la perte complète des ampoules traitées, c'est dire combien est précaire et coûteuse cette fabrication. Nous avons présenté plus haut quelques spécimens d'ampoules ainsi réalisées.

» **ESSAIS DE CONTROLE.** — Les principaux essais électriques sont ceux que l'on fait sur l'ampoule avant le pompage, pour vérifier la valeur de la pression et, par suite, l'étanchéité de l'appareil, et les essais de réception avant départ.

» J'ai déjà parlé des premiers, je n'y reviendrai pas, mais je dirai quelques mots des seconds.

» Le but de cet essai est double :

- » a) Vérifier si l'extraction du gaz est convenable ;
- » b) Vérifier l'étanchéité de l'appareil.

» On procède de la façon suivante :

» A la sortie de la salle de pompage, les ampoules subissent un premier essai électrique à un régime très supérieur au régime d'emploi, mais inférieur au régime de pompage. Si le tube résiste, les différents éléments électriques de l'essai sont soigneusement notés et l'ampoule est envoyée à la gravure (marque de fabrique et numérotage) et au capuchonnage ; si l'ampoule se révèle défectueuse, et cela arrive encore souvent, la nature du défaut est notée, et transmise aux services de recherches par un rapport hebdomadaire.

» Ce rapport est ensuite étudié et, par des classements méthodiques et une analyse soignée des particularités relevées au cours de la fabrication, nous essayons de retrouver les défauts systématiques pour les corriger. Ces opérations sont beaucoup facilitées par l'étude de la fiche de fabrication, qui constitue un dossier détaillé des moindres particularités ou incidents survenus en cours de fabrication.

» Quelque temps après ce premier essai, 8 à 10 jours, par exemple, les ampoules sont de nouveau essayées, mais plus modérément ; si la moindre fuite s'est déclarée, elle est immédiatement

visible, car les constantes électriques de l'essai précédent sont complètement changées. Cet essai est donc surtout un essai d'étanchéité.

» Enfin, après un dernier essai de ce genre, mais répété à un intervalle aussi éloigné que possible, l'ampoule est enfin livrée à la consommation.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

» NATURE DU RAYONNEMENT X ET MOYEN DE LE PRODUIRE. — 1° Les rayons X sont des ondes électromagnétiques extrêmement courtes, et probablement formées d'une seule pulsation, contrairement aux ondes lumineuses qui sont formées de pulsations périodiques. On en connaît dont les longueurs d'onde sont de l'ordre de celles des rayons ultra-violet : ce sont les plus « mous » ; les plus durs sont ceux du radium, dits rayons γ , dont la longueur d'onde est égale à 0,007 unité angstrœm.

» 2° Le seul moyen actuellement employé pour produire ces ondes électromagnétiques est l'arrêt d'une charge électrique animée d'une très grande vitesse ; c'est pourquoi l'onde électromagnétique porte aussi le nom d'onde d'accélération (en l'espèce, il s'agit d'une accélération négative).

» 3° Les charges électriques en mouvement rapide, nécessaires à la production des rayons X, sont, en fait, toujours des électrons, particules d'électricité sans support matériel, de charge toujours semblable. On leur communique la vitesse suffisante en faisant agir sur eux un champ électrique intense.

» 4° La production d'un faisceau d'électrons à grande vitesse, dont les trajectoires s'appellent aussi « rayons cathodiques » ou « faisceau cathodique » ou « flux cathodique », ne peut se faire qu'en l'absence presque complète de matière, c'est-à-dire dans un gaz très raréfié.

» 5° La seule condition indispensable pour que ces rayons cathodiques se produisent, ou ce qui revient au même, pour qu'il y ait décharge entre deux électrodes contenues dans un gaz à basse pression, c'est qu'il y ait production d'électrons à la cathode.

» 6° La production d'électrons à la cathode peut s'obtenir par deux moyens :

» a) *Décharge ionique.* — Par l'afflux d'ions positifs sur la ca-

thode pour arracher des électrons à sa substance. Dans ce cas, l'enceinte doit contenir un gaz à une pression de l'ordre de 0,01 mm de mercure, et l'intensité de la décharge variera avec la pression.

» *b) Décharge électronique.* — Par l'échauffement au rouge d'une partie de la cathode, pour arracher par l'énergie thermique des électrons à sa substance. Dans ce cas, les gaz restants n'interviennent pas ; il est même de beaucoup préférable de les enlever aussi complètement que possible, pour éviter des phénomènes accessoires gênants. L'intensité de la décharge ne dépend alors que de la quantité d'électrons produits à la cathode, c'est-à-dire de la température.

» 7° La vitesse des électrons dépend de la différence de potentiel aux bornes de l'ampoule. A tension constante, le faisceau cathodique sera homogène s'il n'y a pas ou presque pas de collision avec les molécules du gaz restant comme dans le cas de la décharge électronique (pression 10^{-6} mm de mercure) : dans le cas contraire (pression 0,01 mm de mercure), le faisceau sera hétérogène, comme dans le cas de la décharge ionique.

» 8° La direction des rayons cathodiques est celle des lignes de force du champ électrique.

» 9° Pour produire des rayons X à partir de ce faisceau cathodique, il faut arrêter ces électrons aussi brusquement que possible. On obtient cet effet en interposant sur leur trajet un obstacle matériel.

» L'arrêt ne se produisant pas toujours instantanément et la plupart des électrons étant ralentis avant l'arrêt, il en résulte la production de toute une gamme de radiations de longueurs d'onde diverses.

» La plus courte longueur d'onde produite ne dépend que de la vitesse des électrons du faisceau cathodique, donc de la différence de potentiel aux bornes de l'ampoule.

» L'intensité du rayonnement dépend, toutes autres choses égales, de la substance de l'anticathode ; on a intérêt à prendre une substance à nombre atomique aussi élevé que possible.

» 10° Toutes ces précautions étant prises, le rendement en rayons X reste néanmoins très faible ; il ne représente que la 1/1 000^e partie de l'énergie contenue dans le faisceau cathodique.

» CONSTRUCTION DE L'AMPOULE A RAYONS X. — 1° L'ampoule à

rayons X se composera donc, d'après les considérations précédentes :

» a) D'une enceinte de verre autrefois exclusivement construite à la main, exécutée maintenant sur des machines spéciales ;

» b) D'électrodes diverses pour amener le courant dans cette enceinte, la cathode et l'anticathode.

» 2° La cathode et l'anticathode sont généralement disposées face à face suivant un même axe ; pour la commodité de l'emploi, la surface d'impact du faisceau cathodique est inclinée à 45° sur l'axe commun.

» 3° La section du faisceau cathodique doit toujours être petite pour que son impact soit également de section faible, pour des raisons de commodité de construction et pour avoir une surface radiante à peu près punctiforme, de façon à ce que les images radiogènes, qui sont des ombres des objets à examiner, soient aussi nettes que possibles.

» 4° Le choix des métaux pour la constitution de ces électrodes devra être fait avec soin, et les pièces métalliques devront subir des traitements spéciaux avant d'être montées dans l'ampoule.

» 5° L'extraction des gaz se fera différemment, suivant le mode de charge utilisé, modérément pour la décharge ionique, aussi complètement que possible pour la décharge électronique. Ces gaz sont extraits par des pompes puissantes et robustes, pendant que l'on chauffe les pièces autant que le permettent les circonstances, en faisant fonctionner les ampoules à un régime très supérieur à celui qu'elles auront à supporter en service normal.

» 6° Les ampoules complètement terminées subiront des essais électriques très sévères à des intervalles assez espacés, de façon à déceler toute fuite ou dégagement gazeux interne, par le changement des caractéristiques électriques relevées pendant les essais.

» CONCLUSION. — La fabrication des ampoules à rayons X est délicate, longue et coûteuse ; ce n'est qu'en prenant des soins extrêmes, en faisant une étude scientifique des phénomènes mis en jeu, en poursuivant des recherches toujours très longues et délicates, que l'on arrive péniblement à quelques progrès. Aussi, ces appareils sont-ils tous d'un prix élevé, ce qui ne veut pas dire qu'ils sont chers, puisque, malgré les circonstances actuelles très favorables, nos anciens adversaires, seuls grands producteurs d'ampoules à rayons X, quelques années avant la guerre, n'ont pas pu

arriver à nous concurrencer. Cette industrie, qui avait disparu presque complètement de France, a été reprise quelques années avant la guerre et luttait déjà avantageusement contre la concurrence étrangère : elle est maintenant en pleine prospérité et fournit la majeure partie des ampoules à la France, à ses colonies et exporte même une fraction considérable de sa production à l'étranger.

» Ainsi se trouve récompensée la courageuse initiative des fondateurs et des financiers, qui ne craignirent pas d'entreprendre ou d'encourager une fabrication difficile et une lutte commerciale très âpre.

» C'est un exemple que tous les ingénieurs souhaitent de voir suivre, pour le plus grand bien de la France... et de ses techniciens. »

INFORMATIONS

Rectification à la communication de M. Maurice Lavet sur les horloges entretenues électriquement

Le dispositif électrique d'entretien d'un pendule représenté sur la figure 5 (page 477 du Bulletin) ne doit pas être considéré comme une imitation de l'horloge brevetée par M. Féry en 1896, car l'inventeur français Froment avait déjà réalisé en 1855 un système semblable.

Société des Ingénieurs Civils de France

La Société des Ingénieurs civils nous prie d'annoncer que c'est par suite d'une erreur que la communication de M. Mariage sur l'extension des communications dans la région parisienne a été annoncée pour le 26 janvier 1923.

Cette communication aura lieu en réalité le 9 février 1923, à la place de la communication de M. Petitpas. La communication de M. Petitpas aura lieu le 26 janvier 1923, en même temps que la communication de M. Vedovelli.

BIBLIOGRAPHIE

Les Piles électriques. Description et fabrication des piles les plus usitées, dont une grande quantité inédites, par L. Michel, Ingénieur-électricien, inventeur-construteur ; 1 vol. 21 cm × 13 cm, de 135 pages et 100 figures. Paris, Gauthier-Villars et Cie, 1922.

Cet ouvrage s'adresse surtout aux amateurs d'électricité, aux apprentis et ouvriers électriciens, aux serruriers, enfin à tous ceux pour qui l'électricité est un passe-temps, et quelquefois une passion; en dehors d'une description détaillée des piles, ils trouveront les indications nécessaires pour construire celles qui leur paraîtront les plus intéressantes.

L'auteur a complété la description des piles et leur fabrication, par des explications sur les pièces détachées qui les composent, ainsi que sur des formules, recettes et procédés utiles aux amateurs sur la construction des piles qu'ils auront choisies parmi toutes celles décrites dans le volume.

Le livre de l'amateur de T. S. F., par Joseph Roussel, Secrétaire général de la Société française d'étude de Télégraphie et de Téléphonie sans fil. 1 vol. 25 cm × 16 cm, de 304 pages et 206 figures. Paris, Librairie Vuibert, 1921.

Sous une forme bien propre à séduire l'innombrable légion d'amateurs à laquelle il s'adresse, M. J. Roussel, amateur lui-même, a écrit pour ses confrères un ouvrage qui, sans avoir la prétention d'être un traité ou un précis de radiotélégraphie, tient les promesses de son titre.

Après un historique rapide de la télégraphie sans fil et un exposé des généralités et définitions, l'auteur commence par décrire un poste simple et la façon dont le débutant peut le construire par ses propres moyens (de même que la plupart des autres appareils décrits par la suite) ; puis, il indique les perfectionnements graduels à apporter à ce poste en recourant, d'abord, à des appareils de syntonie et, ensuite, à des amplificateurs de plus en plus puissants — pour réaliser enfin le type de poste récepteur complet.

Une série de chapitres sont ensuite consacrés, respectivement : aux pannes des postes de réception (à galène et à lampes) ; à l'inscription graphique des signaux ; aux relais primaires et secondaires ; à la lecture des radiotélégrammes (code international Morse et code américain) ; aux indicatifs ; aux signaux horaires et météorologiques.

Un autre chapitre guide l'amateur en ce qui concerne les matériaux et l'outillage à employer et trois autres l'initient à des notions complémentaires utiles, à des méthodes simples de mesures, etc. Enfin, l'ouvrage se termine par un exposé du statut légal de la télégraphie sans fil en France, et par un coup d'œil vers l'avenir. A signaler, encore, un appendice traitant de diverses questions susceptibles d'intéresser l'amateur, et une bibliographie assez complète.

Théorie succinote, description, conduite et entretien du moteur Diesel, par Y. Le Gallou, ancien officier mécanicien de la Marine, ingénieur de l'Ecole supérieure d'Electricité, avec la collaboration de F. Bounhoure, premier maître mécanicien de la Marine. 1 vol. 28 cm × 19 cm, de VIII-206 pages, avec 115 figures. Paris, Dunod, 1921.

D'aucuns — et l'auteur du présent ouvrage est du nombre — estiment que le moteur Diesel ne tend à rien de moins qu'à révolutionner les installations de force motrice en général, et à se substituer avant peu à la machine à vapeur. non pas, évidemment, pour la réalisation des puissances très élevées (paquebots rapides, grandes stations centrales), mais « pour les cas où il s'agira de

produire aussi économiquement que possible des puissances allant de quelques centaines à 3 ou 4 mille chevaux par arbre, tel, par exemple, celui de la propulsion des navires de commerce ». Or, si l'on considère que le Diesel passe, aujourd'hui, pour le plus économique des moteurs, pareilles conjectures sont raisonnables, et l'on s'explique la vogue croissante du nouveau venu parmi les générateurs de force motrice.

Toutefois, on reproche souvent au Diesel, à tort, disent ceux qui le connaissent bien, « d'être un appareil délicat, coûteux comme entretien et difficile à conduire ». M. Le Gallou, particulièrement expert en la matière, ne pouvait mieux contribuer à détruire toute prévention à l'égard du Diesel, qu'en écrivant son excellente monographie.

Là on trouve, en effet — après une théorie du Diesel, succincte mais remarquablement exposée, et une description détaillée de ses organes, qui forment les deux premières parties de l'ouvrage — une série d'études relatives aux conditions d'emploi des moteurs de ce type, à tout ce qui concerne le point capital du graissage, ainsi qu'à la question, non moins importante, des combustibles à employer, tandis que toute une partie, la quatrième, est réservée à la conduite et aux incidents de fonctionnement des moteurs, et que, dans les deux dernières parties, l'auteur traite des avaries possibles et de l'entretien.

Un pareil guide, on le voit, sera particulièrement précieux entre les mains des chefs mécaniciens, de leurs aides, enfin, de tous ceux qui sont chargés des installations comportant des Diesel. Au point de vue général, cet ouvrage, dont l'opportunité est évidente, mérite une faveur d'autant plus grande que sa présentation (texte et figures) ne laisse aucunement à désirer.

IL Y A TRENTE ANS

La pose du câble sous-marin de Marseille à Oran (M. E. Vlasto). — Appareils à adhérence magnétique (M. de Bovet).

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE TOME II (4^e SERIE).

Bibliographie

Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones.....	112
Album de plans de pose pour l'installation de la force par l'électricité, par M. A. de Graffigny	222
Analogies mécaniques de l'Electricité, par M. J.-B. Pomey.....	220
Conduites d'eau et de gaz, en fonte, en acier et en ciment armé, par M. J. Assaier	77
Cours pratique d'Electricité, par M. P. Roberjot	517
Construction des réseaux d'énergie électrique (Manuel de l'Electricien), par M. Daval	518
Des emplois de l'aluminium dans la construction des machines, par MM. R. de Fleury et R. Labruyère	78
Dictionnaire juridique de l'Industrie électrique, par M. Etienne Carpentier	152
Espace, temps et gravitation, par M. A.-S. Eddington (traduit de l'anglais par M. J. Rossignol)	78
Electrometallurgie (L') du fer et ses alliages, par M. Jean Escard... ..	80
Electricité et Matière, par Sir Joseph J. Thomson	220
Ether ou Relativité, par MM. Gandillot	220
Electroaimants (Les) et les bobines d'induction, par M. H. de Graffigny	464
Essais des machines électriques, par M. C.-F. Guilbert.....	518
Formulaire aide-mémoire de l'Electricien praticien, par M. E. Marec	77
Hydraulique industrielle et usines hydrauliques, par M. Eydoux	222
Introduction à la théorie des courants téléphoniques et de la radiotélégraphie, par M. J.-B. Pomey	223
Le livre de l'Amateur de T. S. F., par Joseph Roussel	581
Le rôle de l'utilisation des chutes d'eau dans l'extension de l'activité industrielle et agricole, par M. Paul Lévy-Salvador	77
Les ressources du travail intellectuel en France, par MM. Ed. Tassy et Pierre Lérus	220
La fraude, la sinistrose et les médecins marrons dans les accidents du travail, par M. Ed. de Giscard	221
Manuel pratique de l'ouvrier electricien mécanicien, par M. Ernst Shulz (traduit par M. L. Sternberg)	221
Manuel de l'Electricien, par M. P. Maurer	222
Machines électriques (théorie, essais et construction), électrotechnique appliquée, par M. A. Mauduit	519
Notions simples et pratiques sur l'électricité et ses applications, par M. A. Gargam de Montcetz	77
Notions élémentaires de Télégraphie sans fil, par M. Jean Rémaur.	221
Notions d'Electricité générale, par M. Ch. Fleury	520
Piles électriques (Les), par L. Michel	561
Répertoire de laboratoires français, par M. Ch. Maurain	518
Technique (La) de la Houille blanche, par M. Etienne Pacoret....	464
Théorie succincte, description, conduite et entretien du moteur Diesél, par M. Y. Le Gallon	581
Traction électrique, par M. René Martin	517
Technique (La) du métier d'électricien, par M. R. Caillaud	520

Communications diverses

Assemblée générale annuelle du 5 avril 1922	153
Allocution de M. J. Rey, Président sortant	190
Allocution de M. le Président	227
Dons à l'Ecole —.....	114, 336, 406

Dons au Laboratoire	114
Dons à la Société	154
Il y a trente ans 80, 112, 152, 224, 288, 336, 408, 520	582
Liste des candidats proposés par le Comité pour le renouvellement partiel du Comité et du Bureau	114
Membres décédés	154, 290, 338, 466
Membres titulaires	5, 81, 113, 153, 225, 289, 337, 465, 522
Prix Rouville	82
Nécrologie : J. Carpentier	523
Nécrologie : F. Brocq	529
Rapport de la Commission des Comptes (M. Locherer)	155
Rapport sur le Laboratoire central et l'Ecole supérieure d'Electricité (M. P. Janet)	163
Rapport du Comité (M. Maurice Leblanc, secrétaire général)	160
Rectifications à la communication de M. M. Lavet	580
Réunion mensuelle ordinaire du 4 janvier 1922	5
Réunion mensuelle ordinaire du 1 ^{er} février 1922	81
Réunion mensuelle ordinaire du 1 ^{er} mars 1922	113
Réunion mensuelle ordinaire du 5 avril	153
Réunion mensuelle ordinaire du 3 mai 1922	225
Réunion mensuelle ordinaire du 7 juin 1922	289
Réunion mensuelle ordinaire du 5 juillet 1922	337
Réunion mensuelle ordinaire du 8 novembre 1922	465
Réunion mensuelle ordinaire du 6 décembre 1922	
Résultat des élections : Renouvellement partiel des Membres du Bu- reau, du Comité et de la Commission des Comptes ; élection d'un Membre d'honneur	188

Communications techniques

Autobus électriques à trolley, dits « trolleybus », par M. Iglésis	339
Ampèremètres électrodynamiques à shunts, par M. Louis Joly	291
Communications téléphoniques entre centrales, par M. Marius Latour.	137
Détermination rapide du champ magnétique terrestre, méthode par- ticulière de comparaison des champs magnétiques (résumé), par M. Pérot	522
Dispositif applicable à tous systèmes de compteurs électriques, en vue d'une tarification variable suivant l'heure et la consommation, par M. Mahl	195
Etude expérimentale sur les pertes d'énergie dans quelques diélectri- ques industriels soumis à une différence de potentiel sinusoïdale, par M. A. Frigon	409
Horloges entretenues électriquement destinées à l'usage courant, par M. Marius Lavet	467
La précipitation électrique des poussières, son application à la puri- fication industrielle des gaz, par M. Saget	83
Les théories électriques de la matière, par M. M. Brillouin	303
Les transmissions électriques dans les engins de guerre (tanks, loco- motives pétroélectriques), par M. Dutilh	389
Les ampoules à rayons X et leur fabrication, par M. Johannès	531
Les grands problèmes actuels de l'appareillage électrique ; les ap- pareils à très haute tension ; les isolateurs suspendus ; les dis- joncteurs ultra-rapides ; les disjoncteurs sélecteurs, par M. Ve- dovelli	9
Les communications téléphoniques entre centrales ; téléphonie pour courants à haute fréquence, par M. Marius Latour	82
Les unités de mesures électriques, par M. Langevin	116
Les pieds pour poteaux en bois, par M. de Traz	261
L'étalonnage des wattmètres en courants alternatifs (travaux du La- boratoire central d'Electricité), par MM. de la Gorce et Bajon.	105
L'omnibus à double trolley étudié par la Société des Transports en Commun de la Région parisienne, par M. Pérudier	379
Potentiomètre à déviation, par M. Ilivici	117

Procédé Outtier pour l'amélioration du cosinus d'une installation de condensateurs, par M. Maurice Leblanc fils	69
Remarques sur la mesure du potentiel le long des chaînes d'isolateurs, par M. P. Janet	101
Remarque sur la communication de M. Bethenod, par M. Iglésis....	183
Remarques sur la communication de M. Langevin, par MM. Abraham, Brylinski, Berthelot	201
Remarques sur la communication de M. de Traz, par M. Lecler	284
Remarques sur la communication de M. Brillouin, par M. Alfred Lartigue	327
Sur les conditions imposées pour la fourniture des lampes à incandescence quant à leurs caractéristiques lumineuses et électriques, par M. G. Pionnier	460
Surtensions dans les transformateurs, par M. Bunet	229
Théorie de la dynamo à trois balais, par M. Bethenod	175
Transmission sans fil des images à distance (avis relatif à cette communication), par M. Belin	522

Résumé des communications étrangères

Capacité de courant des câbles sous plomb, par M. R.-W. Atkinson ..	73
Champ extérieur produit par un électroaimant cylindrique, par M. C.-T. Hutchinson et H. Pender	74
Changement de fréquence des machines électriques, par MM. D.-W. Proebstel et E.-H. Le Tourneau	149
Calculs des forces magnéto motrices des alternateurs à champ cylindrique dans les conditions de court-circuit, par M. A.-E. Clayton	218
Comparateur dynamométrique pour la mesure précise des courants alternatifs, par M. E. Vellander	219
Détection des sous-marins dans un champ magnétique alternatif, par MM. J.-B. Whitehead et L.-O. Gossling	218
Développement des valves thermoioniques dans les applications à la marine, par M. B.-S. Gossling	218
Etude économique d'un système de distribution secondaire, par MM. P.-O. Reyneau et H.-P. Seelye	151
Eclairage par conduction gazeuse, sur circuits à basse tension, par D.-M. Moore	219
« Fullerphone » (Le), par M. A.-C. Fuller	73
La téléphonie sans fil à bord des avions, par M. C.-E. Prince	73
La mise à la terre des conducteurs « Report of the Farthing Subcommittee of the wiring Rules Committee »	75
La perte par surface considérée comme un facteur intervenant dans le calcul des isolateurs, par M. T.-M. Feder	151
L'énergie électrique dans les usines à gaz, par M. H.-C. Wildlake	218
Oscillateur audion, par M. R.-A. Heising	150
Oscillographe portatif, par M. J.-W. Legg	151
Pertes dans le fer aux fréquences élevées, par M. T. Spooner	74
Porcelaine pour isolateurs haute tension, par M. W.-D.-A. Peaslee..	76
Réactances employées dans les circuits des fours électriques, par M. H.-A. Winne	72
Relais à valve, par M. L.-B. Turner	73
Soudure électrique par percussion, par M. D.-F. Miner	72
Systèmes d'excitatrices, par : MM. J.-W. Parker, A.-A. Meyer, H.-R. Summerhayes, C.-A. Boddie, F.-L. Moon, J.-D. Ross, H.-H. Cox et H. Michener	218
Transformateurs pour fours électriques, par M. J.-L. Thompson	75
Traction à vapeur contre traction électrique, par M. A.-H. Armstrong	149
Usure des charbons et des collecteurs, par R.-E. Hellmund	72
Une méthode de mesure par enregistrement direct de la distribution du flux magnétique, par M. F.-S. Dellenbaugh	150

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

CITÉS DANS LE TOME II (4^e SÉRIE)

ABRAHAM. — Remarques sur la communication de M. Langevin (Brylinski Berthelot)	201
ARMSTRONG (A.-H.). — Traction à vapeur contre traction électrique (Résumé)	149
ASSAÏER (J.). — Conduite d'eau et de gaz en fonte, en acier, et en ciment armé (Bibliographie)	77
ATKINSON (A.-H.). — Capacité de courant des câbles sous plomb (Résumé)	73
BAJON et DE LA GORCE. — L'étalonnage des wattmètres en courants alternatifs (travaux du L. C. E.) (par MM.)	105
BELIN. — Transmission sans fil des images à distance (Avis)	522
BERTHELOT (D.). — Remarques sur la communication de M. Langevin	201
BETHENOD. — Théorie de la dynamo à trois balais	175
BRILLOUIN. — Allocution de M. le Président	227
BRILLOUIN (Marcel). — La théorie électrique de la matière	303
BUNET. — Surtensions dans les transformateurs	229
BRYLINSKI (E.). — Remarque sur la communication de M. Langevin	201
CAILLAULT (R.). — Technique (La) du métier d'électricien	530
CARPENTIER (Etienne). — Dictionnaire juridique de l'Industrie électrique (Bibliographie)	152
CLAYTON (A.-E.). — Calculs des formes magnétomotrices des alternateurs à champ cylindrique dans les conditions de court-circuit	218
DAVAL. — Construction des réseaux d'énergie électrique (Manuel de l'Electricien) (Bibliographie)	518
DELLENBAUGH (F.-S.). — Une méthode de mesure par enregistrement direct de la distribution du flux magnétique (Résumé)	150
DUTILH. — Les transmissions électriques dans les engins de guerre (tanks, locomotives pétroélectriques)	389
EDDINGTON (A.-S.). — Espace, temps et gravitation (Ouvrage traduit de l'anglais par M. J. Rossignol)	78
ESCARD (Jean). — Electrometallurgie (L') du fer et ses alliages (Bibliographie)	80
EYDOUX. — Hydraulique industrielle et usines hydrauliques (Bibliographie)	222
FECHHEIMER (C.-J.). — Distribution de flux dans les noyaux des turboalternateurs	150
FEDER (T.-M.). — La perte par surface considérée comme un facteur intervenant dans le calcul des isolateurs (Résumé)	151
FLEURY (de R.) et LABRUYÈRE (R.). — Des emplois de l'aluminium dans la construction des machines (Bibliographie)	78
FLEURY (Ch.). — Notions d'électricité générale (Bibliographie)	520
FRIGON (A.). — Etude expérimentale sur les pertes d'énergie dans quelques diélectriques industriels soumis à une différence de potentiel sinusoïdale	400
FULLER (A.-C.). — Le « Fullerphone » (Résumé)	73
GANDILLOT (M.). — Ether ou relativité (Bibliographie)	220
GARGAM DE MONCETZ (A.). — Notions simples et pratiques sur l'Electricité et ses applications (Bibliographie)	77

GISCARDE (Ed. de). — La fraude, la sinistrose et les médecins mar- rons dans les accidents du travail (Bibliographie)	221
GORCE (de la) et BAJON. — L'étalonnage des wattmètres en courants alternatifs (travaux du L. C. E.) (par)	105
GOSSLING (B.-S.). — Développement des valves thermoioniques dans les applications de la Marine (Résumé)	218
GRAFFIGNY (H. de). — Album de plans de pose pour l'installation de la Force par l'Electricité (Bibliographie)	222
GRAFFIGNY (H. de). — Electroaimants (Les) et les bobines d'induction (Bibliographie)	464
GRONDAHL (L.-O.) et WHITEHEAD (J.-B.). — Détection des sous-marins dans un champ magnétique alternatif (Résumé)	149
GUILBERT (C.-F.). — Essais des machines électriques	518
HEISING (R.-A.). — Oscillateur audion (Résumé)	150
HELLMUND (R.-E.). — Usure des charbons et des collecteurs (Résumé)	72
HUTCHINSON (C.-T.) et PENDER (H.). — Champ intérieur produit par un électroaimant cylindrique (Résumé)	74
IGLÉSI. — Remarque sur la communication de M. Bethenod	183
IGLÉSI. — Autobus électriques à trolley, dits « trolleybus »	339
ILIOVICI. — Potentiomètre à déviation	117
JANET (P.). — Remarques sur la mesure du potentiel le long des chaînes d'isolateur	101
JANET (P.). — Rapport sur le Laboratoire central d'Electricité et l'Ecole supérieure d'Electricité	163
JOHANNÈS. — Les ampoules à rayons X et leur fabrication	531
JOLY (Louis). — Ampèremètres électrodynamiques à shunts	291
LABRUYÈRE (R.) et FLEURY (R. de). — De l'emploi de l'aluminium dans la construction des machines (Bibliographie)	78
LANGVIN. — Les unités de mesures électriques	116
LARTIGUE (Alfred). — Remarques sur la communication de M. Bril- louin	327
LATOUR (Marius). — Les communications téléphoniques entre cen- trales ; téléphonie pour courants à haute fréquence	82
LATOUR (Marius). — Communications téléphoniques entre centrales	137
LAVET (Marius). — Horloges entretenues électriquement destinées à l'usage courant	467
LAVET (Marius). — Rectification à la communication de	580
LEBLANC (Maurice, fils). — Procédé Outtier pour l'amélioration du cosinus d'une installation à l'aide d'une installation de conden- sateurs	69
LEBLANC (Maurice), Secrétaire général. — Rapport du Comité	160
LECLER. — Remarques sur la communication de M. de Traz	284
LE GALLOU (Y.). — Théorie succincte, description, conduite et entre- tien du moteur Diesel (Bibliographie)	581
LEGG (J.-W.). — Oscillographe portatif (Résumé)	151
LÉRIS (Pierre). — Les ressources du travail intellectuel en France (Bibliographie)	220
LE TOURNEUR (E.-H.) et PROESBEL (D.-W.). — Changement de fréquen- ce des machines électriques (Résumé)	149
LEVY-SALVADOR (Paul). — Le rôle de l'utilisation des chutes d'eau dans l'extension de l'activité individuelle et agricole	77
LOCHERER. — Rapport de la Commission des Comptes	155
MAHL. — Dispositif applicable à tous systèmes de compteurs électri- ques en vue d'une tarification variable suivant l'heure et la con- sommation	195
MAREC (E.). — Formulaire aide-mémoire de l'Electricien praticien (Bibliographie)	77
MARTIN (René). — Traction électrique (Bibliographie)	517
MAUDUIT (A.). — Machines électriques (théorie, essais et construc- tion) ; Electrotechnique appliqué (Bibliographie)	519
MAURAIN (C.). — Répertoire de laboratoires français (Bibliographie)	518
MAURER (P.). — Manuel de l'Electricien (Bibliographie)	222
MICHEL (L.). — Les piles électriques (Bibliographie)	581
MINER (D.-F.). — Soudure électrique par percussion (Résumé)	72

MOORE (D.-M.). — Eclairage par conduction gazeuse, sur circuits à basse tension (Résumé)	219
PACORET (Etienne). — Technique (La) de la houille blanche (Bibliographie)	464
PARKER (J.-W.), MEYER (A.-A.), SUMMERHAYES (H.-R.), BODDIE (C.-A.), MOON (F.-L.), ROSS (J.-D.), COX (H.-H.) et MICHENER (H.). — Systèmes d'excitatrices (par MM.)	218
PEASLEE (W.-D.-A.). — Porcelaine pour isolateurs à haute tension (Résumé)	76
PENDER (H.) et HUTCHINSON (C.-T.). — Champ extérieur produit par un électroaimant cylindrique (Résumé)	74
PÉRIDIER. — L'omnibus à double trolley étudié par la Société des Transports en Commun de la Région parisienne	379
PÉROT (A.). — Détermination rapide du champ magnétique terrestre. Méthode particulière de comparaison des champs magnétiques (résumé)	522
PIONNIER (G.). — Sur les conditions imposées pour la fourniture des lampes à incandescence quant à leurs caractéristiques lumineuses et électriques	460
POMEY (J.-B.). — Analogies mécaniques de l'Electricité (par) (Bibliographie)	220
POMEY (J.-B.). — Introduction à la théorie des courants téléphoniques et de la radiotélégraphie (Bibliographie)	223
PRINCE (C.-L.). — La téléphonie sans fil à bord des aéroplanes (Résumé)	73
PROESBEL (D.-W.) et LE TOURNEUR (E.-H.). — Changement de fréquence des machines électriques (Résumé)	149
RÉMAUR (Jean). — Notions élémentaires de télégraphie sans fil (Bibliographie)	221
« Report of The Earthing Sub-Committee of the wiring Rules Committee » — La mise en terre des conducteurs (Résumé)	75
REY (Jean). — Allocution (Président sortant)	190
REYNEAU (P.-O.) et SEELYE (H.-P.). — Etude économique d'un système de distribution secondaire (Résumé)	151
ROBERJOT (P.). — Cours pratique d'Electricité (Bibliographie)	517
ROUSSEL (J.). — Le livre de l'Amateur de T. S. F.	581
SAGET. — La précipitation électrique des poussières, son application à la purification industrielle des gaz	83
SEELYE (H.-P.) et REYNEAU (P.-O.). — Etude économique d'un système de distribution secondaire (Résumé)	151
SHULZ (Ernest) (traduit par L. Sternberg). — Manuel pratique de l'ouvrier électricien-mécanicien (Bibliographie)	221
SPOONER (T.). — Pertes dans le fer aux fréquences élevées (Résumé) ..	74
STERNBERG (L.). — Traduction du Manuel pratique de l'ouvrier électricien-mécanicien de Shulz (Ernest) (Bibliographie)	221
TASSY (Edwe) et LÉRIS (Pierre). — Les ressources du travail intellectuel en France (Bibliographie)	220
THOMPSON (J.-L.). — Transformateurs pour fours électriques (Résumé) ..	75
THOMSON (Joseph). — Electricité et Matière (Bibliographie)	220
TRAZ (de). — Les pieds pour poteaux en bois	261
TURNER (L.-B.). — Relais à valve (Résumé)	73
VEDOVELLI. — Les grands problèmes actuels de l'appareillage électrique ; les appareils à très haute tension ; les isolateurs suspendus ; les disjoncteurs sélecteurs	9
VELANDER (E.). — Comparateur dynamométrique pour la mesure précise des courants alternatifs (Résumé)	219
WHITEHEAD (J.-B.) et GRONDAHL (L.-O.). — Détection des sous-marins dans un champ magnétique alternatif (Résumé)	149
WILDLAKE (H.-C.). — L'énergie électrique dans les usines à gaz (Résumé)	218
WINNE (H.-A.). — Réactances employées dans les circuits des fours électriques (Résumé)	72

Le Gérant : J. GUYOT.

IMP. HENRIOT — 30, RUE GEBERT, PARIS

ERRATA

ARTICLE DE M. PÉRIDIER

Le titre de l'article doit être : Sous-stations *automates*.

Page 6. — Ligne 27 à supprimer.

— Ligne 29 : remplacer (1) par (2).

— Avant-dernière ligne : remplacer (1) par (2).

Page 27. — Note : au lieu de *voici*, lire *voir*.

Page 28. — Ligne 16 : après... d'un flash, ajouter : rend indisponible une machine et il est indispensable qu'elle soit complètement...

Page 59. — Conclusion (5^e alinéa), remplacer : Le succès..., etc..., par : Il n'est donc pas possible, à proprement parler, de qualifier de nouveauté...

MOORE (bass
 PACORET
 graf
 PARKER
 Moc
 mes
 PEASLEE
 sum
 PENDER
 élec
 PÉRIDIE
 Tra
 PÉROT (Métl
 (rés
 PIONNIE
 lam
 et é
 POMEY (graf
 POMEY (et
 PRINCE
 sum
 PROESBE
 que
 RÉMAUR
 blio
 « Repoi
 mit
 REY (Je.
 REYNEAU
 de
 ROBERJC
 ROUSSEI
 SAGET.
 tion
 SEELYE
 de
 SHULZ (Pou
 SPOONEI
 STERNBI
 tric
 TASSY (lect
 THOMPS
 THOMSO
 TRAZ (C
 TURNER
 VEDOVEI
 que
 dus
 VELANDI
 cisi
 WHITEH
 dar
 WILDLA
 sun
 WINNE
 élec





G.E. STECHERT, Co.
(ALFRED HAFNER)
NEW YORK

Digitized by Google

UNIVERSITY OF MINNESOTA
sci.pere ser.4:t.2

Soci et e fran caise des electriciens.
Bulletin de la Soci et e fran caise des



3 1951 000 874 746 F

Minnesota Library Access Center



9 ZA R02 D19 S04 TH S